

TUGAS AKHIR - TM 141585

PERANCANGAN DAN ANALISIS *ELECTRODYNAMIC SHAKER* UNTUK PENGUJIAN DINAMIS A-ARM PADA *SAPUANGIN SPEED*

DEVI MAHARANI KOSA
NRP 2113 100 197

Dosen Pembimbing
Dr. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2017



TUGAS AKHIR – TM141585

PERANCANGAN DAN ANALISIS *ELECTRODYNAMIC SHAKER* UNTUK PENGUJIAN DINAMIS *A-ARM* PADA *SAPUANGIN SPEED*

DEVI MAHARANI KOSA
NRP. 2113100197

Dosen Pembimbing:
Dr. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng.

PROGRAM SARJANA
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2017



FINAL PROJECT – TM141585

**DESIGN AND ANALYSIS OF ELECTRODYNAMIC
SHAKER FOR A-ARM DYNAMIC TESTING ON
*SAPUANGIN SPEED***

DEVI MAHARANI KOSA
NRP. 2113100197

Advisor
Dr. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng.

BACHELOR'S PROGRAMME
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2017

PERANCANGAN DAN ANALISIS *ELECTRODYNAMIC SHAKER* UNTUK PENGUJIAN DINAMIS A-ARM PADA *SAPUANGIN SPEED*

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

DEVI MAHARANI KOSA

NRP. 2113 100 197

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Harus Laksana Guntur, ST, M.Eng.
NIP. 197505111999031001
2. Dr. Wiwiek Hendrowati, ST, MT
NIP. 197004121997032003
3. Moch. Solichin, ST, MT
NIP. 198908172015041003
4. Achmad Syaifudin, ST, M.Eng, PhD.
NIP. 197909262005011001



SURABAYA

JULI, 2017

PERANCANGAN DAN ANALISIS *ELECTRODYNAMIC SHAKER* UNTUK PENGUJIAN DINAMIS A-ARM PADA SAPUANGIN SPEED

Nama Mahasiswa : Devi Maharani Kosa
NRP : 2113 100 197
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Harus Laksana Guntur, ST.,
M.Eng.

Abstrak

Electrodynamic shaker merupakan sistem yang dirancang untuk mengetahui karakteristik dinamis suatu elemen setelah dikenai beban. Electrodynamic shaker yang dirancang berdasarkan acuan shaker yang sudah ada dan memiliki sistem translasi sederhana. Rancangan shaker ini dapat menganalisa karakteristik dinamis dari sebuah a-arm terlebih dahulu untuk menghindari kegagalan pada a-arm seperti terjadinya bending atau patah akibat menahan beban kendaraan. A-arm merupakan salah satu komponen suspensi yang berperan penting saat mobil balap melaju. Hasil analisa karakteristik dinamis a-arm dibutuhkan untuk kesesuaian ketika penyetelan a-arm ke body kendaraan dan perlu dilakukan modal testing oleh electrodynamic shaker pada a-arm untuk melakukan analisa. Pemilihan shaker yang spesifik sangat krusial untuk mendapatkan data modal testing dengan akurasi tinggi serta menghasilkan rancangan a-arm yang handal. Pada rancangan ini, parameter dinamis dari shaker dicari dan disesuaikan dengan karakteristik dari a-arm.

Pada penelitian ini, dilakukan simulasi dengan input sinusoidal menggunakan software MATLAB Simulink untuk mendapatkan parameter redaman dari shaker. Input arus yang digunakan adalah sebesar 12.5 A dengan frekuensi listrik 50 Hz. Untuk mengetahui respon sistem saat terkena perubahan input arus dilakukan variasi nilai yang berbeda yaitu sebesar 12.5 A, 10.5 A, dan 14.5 A. Selain itu, untuk mengetahui respon sistem

yang menggunakan material komponen uji yang berbeda, dilakukan juga variasi material objek uji dengan material steel dan carbon fiber.

Dari penelitian didapatkan analisa variasi arus yang menunjukkan bahwa peningkatan besar arus berbanding lurus dengan besarnya nilai respon perpindahan, kecepatan, dan percepatan electrodynamic shaker dan a-arm. Sedangkan untuk perbedaan material respon dinamis perpindahan pada material carbon fiber lebih kecil karena kekakuannya yang lebih tinggi. Diperoleh juga respon dinamis sistem yang sesuai dengan karakteristik a-arm dan didapatkan parameter redaman shaker yang ideal sebesar 5000 Ns/m.

Kata Kunci : *Electrodynamic Shaker, A-Arm, Arus, Sapuan*gin Speed, Translasi.

DESIGN AND ANALYSIS OF ELECTRODYNAMIC SHAKER FOR A-ARM DYNAMIC TESTING ON SAPUANGIN SPEED

Student Name : Devi Maharani Kosa
Student Number : 2113 100 197
Department : Mechanical Engineering
Advisor : Dr. Harus Laksana Guntur, ST.,
M.Eng.

Abstract

Electrodynamic shaker is a system that designed in order to acquaint the dynamic response of an element after being excited by a load. The shaker is designed based on common shakers and has a simple translation system. This shaker can analyse the dynamic characteristics of a-arm to avoid failures such as bending and fracture because of vehicle load repression. A-arm is one of the most important component of suspension when a formula car runs. The result of the dynamic characteristic analysis is used for the component setting and a modal testing on a-arm by an electrodynamic shaker is needed to get the analysis result. A specific selection of shaker is crucial in order to obtain a high accuracy of modal testing data and produce a high quality a-arm. In this system, the dynamic parameter is expected and has been adjusted to a-arm characteristics.

In this research, the simulation uses sinusoidal input from MATLAB Simulink software to obtain damping parameter. The system is using 12.5 A for the current input and 50 Hz for the electricity frequency. To acquire the system responses of current input variance, this simulation has 12.5 A, 10.5 A, and 14.5 A for the current variations. Moreover, a variation of a-arm material with steel and carbon fiber is also conducted to acquire the system responses of object material variance.

From the research, the analysis of current variance is obtained and it shows that as current increases, the value of dynamic responses of shaker and a-arm are increase as well.

Meanwhile, the object material variance shows that as stiffness increases, the object displacement response decreases as shown by the high stiffness coefficient of carbon fiber characteristics. System dynamic responses that suited to a-arm characteristics is gained and the appropriate damping parameter is 5000 Ns/m.

Keywords : Electrodynamic Shaker, A-Arm, Current, Sapuangin Speed, Translation.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas karunia-Nya sehingga penulisan Tugas Akhir ini dapat terselesaikan.

Tugas Akhir ini merupakan persyaratan untuk memperoleh gelar sarjana teknik bidang studi Vibrasi dan Sistem Dinamis Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis menyadari bahwa keberhasilan dalam penyelesaian tugas akhir ini tidak lepas dari dukungan dan bantuan dari berbagai pihak, baik langsung maupun tidak langsung, oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang setinggi – tingginya kepada:

1. Ayah dan ibu tercinta, I Gede Rai Kosa dan Ni Luh Suastini Kosa yang selalu mendukung secara moril dan materil, membimbing, dan juga menasehati saya sampai detik ini. Dan terima kasih kepada kakak saya tercinta Dewi Nareswari Kosa yang selalu mendukung dalam setiap langkah saya.
2. Dr. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah memberikan arahan dan petunjuk berharga mengenai penulisan tugas akhir.
3. Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT., M. Solichin, ST., MT., dan Achmad Syaifudin, ST., M. Eng., PhD. selaku dosen penguji pada sidang tugas akhir saya yang telah memberikan saran dan kritik demi kesempurnaan tugas akhir ini.
4. Seluruh dosen Teknik Mesin FTI-ITS, yang telah mendidik dan memberikan ilmu pengetahuan yang sangat bermanfaat bagi penulis.
5. Seluruh karyawan Teknik Mesin FTI-ITS, yang telah turut membantu demi kelancaran dalam pengerjaan tugas akhir ini.

6. Fiky Nuzulla Darsono dan Alvibrionasis Aseptis Dheninta selaku teman seperjuangan tugas akhir ini yang selalu setia membantu saya dalam proses pengerjaan. Joko Ade Nugroho, Mohammad Khaqqul Yaqin, Ariyan Karlino, dan teman-teman ITS Team Sapuangin lainnya yang telah berbaik hati untuk membantu saya dalam pemahaman materi tugas akhir ini.
7. Seluruh warga Laboratorium Vibrasi dan Sistem Dinamis serta semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir.

Dengan segala keterbatasan kemampuan dan pengetahuan penulis, tidak menutup kemungkinan tugas akhir ini jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis bersedia menerima kritik dan saran dari berbagai pihak untuk penyempurnaan lebih lanjut. Semoga hasil penulisan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 <i>Forced Vibration Multi Degree of Freedom (MDoF)</i>	5
2.2 <i>Damping Constant of a Parallel Plates Separated by Viscous Fluid</i>	6
2.3 Konsep Elektromagnetik dan Sistem Elektromekanik	8
2.4 <i>Electrodynamic Shaker</i>	12
2.4.1 <i>Stinger</i>	18
2.5 <i>Double Wishbone Suspension System (A-Arm)</i>	19
2.5.1 Sistem Suspensi pada <i>Sapuangin Speed</i>	21
2.6 Penelitian Terdahulu	22
2.7 Referensi <i>Electrodynamic Shaker</i> yang Sudah Ada di Pasaran	33
BAB III METODE PENELITIAN	35
3.1 Metode Penelitian	35
3.1.1 Tahap Studi Literatur	37
3.1.2 Identifikasi Masalah	37
3.1.3 Perancangan Sistem <i>Electrodynamic Shaker</i>	38
3.1.4 Pemodelan Sistem Dinamis dan Persamaan Gerak	39
3.1.5 Verifikasi Konstanta Kekakuan <i>Electrodynamic Shaker</i>	39
3.1.6 Pembuatan Blok Diagram dan Simulasi MATLAB Simulink dengan Input Sinusoidal	39
3.1.7 Penentuan Konstanta Redaman	40
3.1.8 Analisa Grafik Respon Dinamis dengan Input Sinusoidal ...	40

3.1.9	Desain 3D <i>Electrodynamic Shaker</i> yang Sesuai untuk Pengujian A-Arm dan Analisa Grafik.....	40
3.1.10	Simulasi MATLAB Simulink dengan Input Step	41
3.1.11	Penentuan Variasi Input Arus dan Material Objek.....	41
3.1.12	Analisa Grafik Respon Dinamis Input Step, dan Respon Dinamis Variasi.....	42
3.2	Pemodelan Dinamis dan Penentuan Persamaan Gerak dari Rancangan Sistem <i>Electrodynamic Shaker</i>	42
3.3	Simulasi.....	46
3.3.1	Analisis Grafik Sistem <i>Electrodynamic Shaker</i>	47
3.4	Blok Diagram.....	48
3.4.1	Input yang Digunakan	48
3.4.2	Blok Diagram Utama dan Variasi	48
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	53
4.1	Perancangan Sistem <i>Electrodynamic Shaker</i> beserta Komponen A-Arm	53
4.1.1	Verifikasi Konstanta Kekakuan	54
4.2	Pemodelan Sistem <i>Electrodynamic Shaker</i> beserta Komponen A-Arm	55
4.3	Analisa Pemodelan.....	59
4.3.1	Respon Dinamis Sinusoidal	60
4.3.2	Respon Input Step	63
4.3.3	Respon Dinamis Variasi Arus dan Material A-Arm	66
4.3.4	<i>Electrodynamic Shaker Final Design</i>	74
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	77
5.1	Kesimpulan	77
5.2	Saran	78
	DAFTAR PUSTAKA	79
	LAMPIRAN.....	81
	BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sistem getaran multi derajat kebebasan ^[1]	5
Gambar 2.2 Free body diagram multi derajat kebebasan ^[1]	5
Gambar 2.3 Parallel Plates with a Viscous Fluid in Between ^[1]	7
Gambar 2.4 Aturan kaidah tangan kanan untuk gaya pada sebuah konduktor ^[1]	10
Gambar 2.5 Aturan kaidah tangan kanan untuk voltase terinduksi pada konduktor yang bergerak ^[1]	11
Gambar 2.6 Representasi dari sistem translational mechanical, (a) alur daya Elektrikal- Mekanikal, (b) alur daya Mekanikal- Elektrikal ^[1]	11
Gambar 2.7 Gambar skematik electrodynamic shaker dan karakteristik resonansi pada electrodynamic shaker secara umum ^[1]	13
Gambar 2.8 Modal testing secara umum dengan electrodynamic shaker ^[2]	14
Gambar 2.9 Model fisik mikrofon ^[3]	15
Gambar 2.10 Model skematik mikrofon ^[1]	16
Gambar 2.11 (a) Hubungan bagian dari koil tunggal, (b) Diagram yang digunakan untuk analisa ^[1]	16
Gambar 2.12 Pemasangan stinger pada electrodynamic shaker ^[2]	18
Gambar 2.13 Sistem suspensi dengan A-Arm ^[4]	20
Gambar 2.14 Upper dan lower arm dari sistem suspensi bagian depan beserta susunannya ^[5]	21
Gambar 2.15(a) isometrik (b) tampak depan (c) tampak samping	22
Gambar 2.16 Susunan Front Upper A-arm carbon tube ^[5]	23
Gambar 2.17 Free body diagram gaya normal roda tampak depan ^[5]	25
Gambar 2.18 Free Body Diagram Electrodynamic Shaker	26
Gambar 2.19 Free Body Diagram Electrical Components	26

Gambar 2.20 (a) Time Domain Analysis untuk perpindahan dari movable mass (MD, MF). (b) Time Domain Analysis untuk perpindahan dari internal mass structure. (c) Frequency Domain Analysis untuk Mengidentifikasi Modes of Vibration	28
Gambar 2.21 Kinerja Shaker	29
Gambar 2.22 Instalasi Pengujian Cylindrycal Shells dengan Menggunakan Electrodynamic Shaker.....	30
Gambar 2.23 Pemodelan Fisik Shells.....	31
Gambar 2.24 Getaran pada disk, dengan percepatan maksimum (a) Eksperimen dan (b) Simulasi, dengan tingkat eksitasi 0,1 V	32
Gambar 2.25 Referensi dan spesifikasi shaker tipe 2025E <i>The Modal Shop</i> [6]	33
Gambar 3.1 Diagram alir penyelesaian tugas akhir.....	36
Gambar 3.2 <i>Electrodynamic shaker</i> (a) model fisik, (c) instalasi pada objek uji	43
Gambar 3.3 Model dinamis sistem utama dengan objek uji berupa <i>A-Arm</i>	44
Gambar 3.4 <i>Perhitungan displacement maksimum dengan step force (280 N) pada steel a-arm</i>	46
Gambar 3.5 Diagram alir pembuatan blok diagram Simulink sistem <i>electrodynamic shaker</i>	47
Gambar 3.7 Blok diagram sistem utama oleh MATLAB Simulink dengan input Sinusoidal.....	49
Gambar 3.8 Blok diagram sistem utama oleh MATLAB Simulink dengan input step	50
Gambar 3.9 Blok diagram subsistem pertama oleh MATLAB Simulink dengan input sinusoidal dan variasi 3 buah arus.....	50
Gambar 3.10 Blok diagram subsistem kedua oleh MATLAB Simulink dengan input sinusoidal dan variasi 2 buah material uji.....	51

Gambar 4.1 Rancangan <i>electrodynamic shaker</i> (a) model sistematis, (b) model fisik, (c) instalasi pada objek uji.....	54
Gambar 4.2 Analisa tingkat keamanan pada <i>flexible support</i> ...	54
Gambar 4.3 Model dinamis sistem utama dengan objek uji berupa A-Arm	55
Gambar 4.4 <i>Free body diagram electrodynamic shaker</i> beserta a-arm	56
Gambar 4.5 <i>Free Body Diagram</i> Sistem Elektrik <i>Electrodynamic Shaker</i>	58
Gambar 4.6 Gaya elektris oleh <i>electrodynamic shaker</i> dengan input sinusoidal	60
Gambar 4.7 Grafik respon dinamis (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan <i>electrodynamic shaker</i> dengan input sinusoidal	61
Gambar 4.8 Grafik respon dinamis (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan A-Arm dengan input sinusoidal.....	62
Gambar 4.9 Gaya elektris oleh <i>electrodynamic shaker</i> dengan input step.....	63
Gambar 4.10 Grafik respon dinamis (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan <i>electrodynamic shaker</i> dengan input step	64
Gambar 4.11 Grafik respon dinamis (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan A-Arm dengan input step	65
Gambar 4.12 Gaya elektris oleh <i>electrodynamic shaker</i> dengan variasi besar arus oleh input sinusoidal .	67
Gambar 4.13 Grafik respon dinamis (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan <i>electrodynamic shaker</i> dengan variasi besar arus oleh input sinusoidal	68

Gambar 4.14 Grafik respon dinamis (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan <i>A-Arm</i> dengan variasi besar arus oleh input sinusoidal	69
Gambar 4.15 Grafik perubahan besar perpindahan terhadap besar arus.....	70
Gambar 4.16 Gaya listrik oleh <i>electrodynamic shaker</i> dengan variasi material objek uji oleh input sinusoidal.....	71
Gambar 4.17 Grafik respon dinamis (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan <i>electrodynamic shaker</i> dengan variasi material objek uji oleh input sinusoidal	72
Gambar 4.18 Grafik respon dinamis (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan <i>A-Arm</i> dengan variasi material objek uji oleh input sinusoidal..	73
Gambar 4.19 Grafik perubahan besar perpindahan terhadap perbedaan material objek uji	74
Gambar 4.20 Desain akhir dari <i>electrodynamic shaker</i> (a) dengan keterangan, (b) dengan ukuran, (c) tampak atas	76

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 <i>Unsprung Masses</i> ^[5]	23
Tabel 2.2 Material <i>properties</i> dari <i>carbon fiber</i> yang digunakan (Kyoto-carbon.corp)	24
Tabel 2.3 Parameter yang digunakan pada <i>stinger</i> ^[7]	30
Tabel 2.4 Parameter <i>shaker</i> ^[8]	31
Tabel 2.5 Parameter <i>shell-disk</i> ^[8]	32
Tabel 3.1 Parameter yang digunakan dalam perhitungan	45
Tabel 3.2 Parameter yang digunakan dalam variasi arus dan material objek	45
Tabel 3.3 Data karakteristik variasi material yang digunakan.....	45
Tabel 4.1 Data hasil respon sistem dengan input sinusoidal	62
Tabel 4.2 Data hasil respon sistem dengan input step.....	65
Tabel 4.3 Data hasil respon sistem dengan variasi arus	69
Tabel 4.4 Data hasil respon sistem dengan variasi material objek uji	73

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Institut Teknologi Sepuluh Nopember merupakan salah satu peserta kompetisi mobil formula internasional, *Student Formula Japan*, yang diselenggarakan oleh *Japan Society of Automotive Engineer*. Mobil atau kendaraan yang dikompetisikan akan dihadapkan pada berbagai kondisi diantaranya adalah tes *skidpad*, *acceleration*, *autocross*, dan *endurance* ^[9]. Kendaraan harus didesain sedemikian rupa untuk memenuhi kriteria dan dapat memberikan performa optimal. Sebuah mobil balap formula adalah sebuah bentuk mobil yang disederhanakan dari mobil balap *Formula One* yang didesain dan dibangun oleh mahasiswa-mahasiswa universitas untuk keperluan kompetisi. Suspensi berperan penting saat mobil balap melaju. Umumnya, *double wishbone suspension* dengan *pullrod* ataupun *a-arm pushrod* digunakan untuk memudahkan dalam mendesain dan memperingan bobot komponen-komponen yang digunakan ^[10]. Kegagalan pada *a-arm* seperti terjadinya *bending* atau patah akibat menahan beban kendaraan dapat dihindari dengan menganalisa karakteristik dinamis dari *a-arm* tersebut terlebih dahulu. Hasil analisa karakteristik dinamis *a-arm* dibutuhkan untuk kesesuaian ketika penyetelan *a-arm* ke *body* kendaraan dan untuk melakukan analisa maka perlu dilakukan *modal testing* oleh *electrodynamic shaker* pada *a-arm*. Pemilihan *shaker* yang spesifik sangat krusial untuk mendapatkan data *modal testing* dengan akurasi tinggi serta menghasilkan rancangan *a-arm* yang handal.

Electrodynamic shaker adalah sebuah alat uji getar untuk mengetahui respon dinamis suatu elemen setelah dikenai beban. *Electrodynamic shaker* berfungsi memberikan *output* berupa gaya dinamis terhadap objek uji. Gaya dinamis tersebut akan menghasilkan respon dinamis objek uji dan dapat diketahui efek dari beban terhadap struktur suatu komponen serta modal parameternya berupa frekuensi natural, faktor redaman, dan *mode*

shape. *Mode shape* adalah bentuk struktur ketika bergetar pada frekuensi natural.

Berdasarkan hal di atas, permasalahan yang masih harus dianalisa adalah bagaimana merancang sebuah *electrodynamic shaker* yang dapat mengetahui respon struktur *a-arm* terhadap beban. Sehingga dibutuhkan alat yang mampu merepresentasikan beban dinamis pada *a-arm* untuk menguji dan mengetahui rancangan suatu *a-arm* yang ideal. Alat tersebut akan digunakan sebelum struktur kendaraan tersebut diaplikasikan pada kehidupan nyata saat kompetisi. *Electrodynamic shaker* yang akan dirancang berdasarkan acuan katalog dan memiliki sistem translasi. Sistem yang digunakan paling sederhana namun mampu memenuhi kriteria pengujian *modal analysis*. Dengan sistem yang sederhana tersebut diharapkan agar alat ini mudah untuk direalisasikan serta membutuhkan biaya yang lebih sedikit dalam pembuatannya.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana rancangan dari *electrodynamic shaker* untuk pengujian *a-arm* pada mobil *Sapuangan Speed*?
2. Bagaimana karakteristik dinamis dari rancangan *electrodynamic shaker* untuk pengujian *a-arm* pada mobil *Sapuangan Speed*?
3. Bagaimana *transient response* sistem rancangan *electrodynamic shaker* untuk pengujian *a-arm* pada mobil *Sapuangan Speed*?
4. Bagaimana pengaruh perubahan respon dinamis terhadap variabel arus dan material uji pada rancangan *electrodynamic shaker* untuk pengujian *a-arm* pada mobil *Sapuangan Speed*?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Merancang *electrodynamic shaker* untuk pengujian dinamis *a-arm* pada mobil *Sapuangan Speed*.
2. Memodelkan dan menganalisa karakteristik dinamis dari rancangan *electrodynamic shaker* untuk pengujian *a-arm* pada mobil *Sapuangan Speed*.
3. Mengetahui *transient response* sistem rancangan *electrodynamic shaker* untuk pengujian *a-arm* pada mobil *Sapuangan Speed*.
4. Mengetahui pengaruh perubahan respon dinamis terhadap variabel arus dan material uji pada rancangan *electrodynamic shaker* untuk pengujian *a-arm* pada mobil *Sapuangan Speed*.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Parameter yang digunakan dalam simulasi didapat dari jurnal.
2. Parameter dimensi dan sistem elektris *electrodynamic shaker* yang digunakan didapat dari jurnal dan katalog.
3. Perancangan alat *electrodynamics shaker* diutamakan pada fungsi/fenomena dinamis.
4. Tidak terjadi *buckling* pada *stinger*.
5. Massa komponen uji dianggap uniform atau berupa *lumped mass* (massa yang mengumpul).
6. Komponen *a-arm* yang digunakan adalah *upper arm* pada bagian depan sistem suspensi.
7. Input yang digunakan dalam simulasi yaitu input *step* dan input *sinusoidal*.
8. Rangkaian elektris menggunakan magnet permanen sehingga besar medan magnet yang dihasilkan konstan.
9. Nilai hambatan induktansi akibat kehilangan efek magnetik (L) pada sistem elektris *electrodynamic shaker* sangat kecil (mendekati nol) sehingga dapat diabaikan.

1.5 Manfaat Penelitian

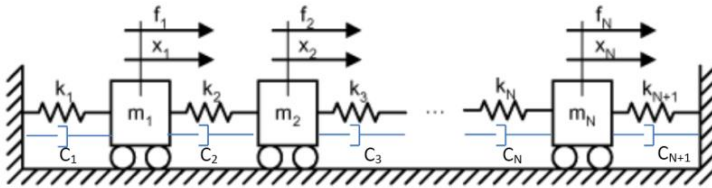
Adapun manfaat dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Pemodelan dapat digunakan sebagai referensi bilamana tugas akhir ini dilanjutkan sebagai rancang bangun *electrodynamic shaker*.
2. Sebagai rekomendasi untuk pengujian saat perancangan *a-arm* pada *Sapuangin Speed* dalam kompetisi *Student Formula Japan* sehingga dapat memberikan capaian yang lebih baik.

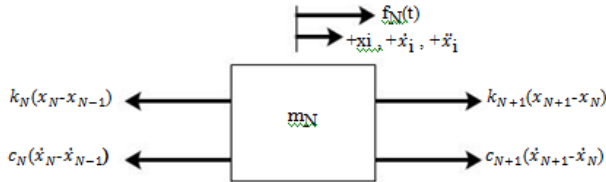
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Forced Vibration Multi Degree of Freedom (MDoF)*

Sistem getaran dengan multi derajat kebebasan (MDOF) adalah sistem yang digunakan untuk menentukan kedudukan massa dalam ruang yang membutuhkan banyak (n) arah koordinat bebas. Sistem getaran tersebut dapat digambarkan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1 berikut ini.



Gambar 2.1 Sistem getaran multi derajat kebebasan ^[1]



Gambar 2.2 *Free body diagram* multi derajat kebebasan ^[1]

Untuk analisa multi derajat kebebasan dapat dilihat pada gambar 2.2. Persamaan gerak dari sistem diatas untuk massa m_N dapat disederhanakan menjadi:

$$m_N \ddot{x}_N - c_N \dot{x}_{N-1} + (c_N + c_{N+1}) \dot{x}_N - C_{N+1} \dot{x}_{N+1} - k_N x_{N-1} + (k_N + k_{N+1}) x_N - k_{N+1} x_{N+1} = F_N(t) \quad (2.1)$$

Persamaan (2.2) dapat digambarkan dengan metode matriks sehingga didapatkan

$$[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + [K]x = \{F\} \quad (2.2)$$

dengan M mewakili matriks massa, K matriks kekakuan dan C matriks redaman yang mempunyai jumlah baris dan kolom yang sama yaitu n.

$$[m] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & & 0 \\ & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & m_N \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

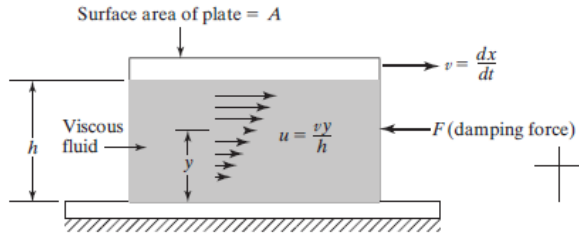
$$[c] = \begin{bmatrix} c_1+c_2 & -c_2 & 0 & & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2+c_3 & -c_3 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3+c_4 & & 0 & 0 \\ & \vdots & & \ddots & \vdots & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -c_N & (c_N+c_{N+1}) \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$[k] = \begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 & 0 & & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2+k_3 & -k_3 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3+k_4 & & 0 & 0 \\ & \vdots & & \ddots & \vdots & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -k_N & (k_N+k_{N+1}) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

2.2 *Damping Constant of a Parallel Plates Separated by Viscous Fluid*

Dua buah plat parallel dipisahkan oleh jarak h , dengan viskositas fluida μ diantara dua plat, dimana salah satu plat

bergerak dengan kecepatan relatif v . Hal ini seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 *Parallel Plates with a Viscous Fluid in Between* ^[1]

Lapisan cairan dengan plat bergerak bergerak dengan kecepatan v , sementara mereka yang berhubungan dengan plat yang tidak bergerak. Kecepatan dari cairan yang ada ditengah diasumsikan bervariasi linear antara 0 sampai dengan v seperti pada gambar 2.3. Menurut Hukum Newton mengenai *viscous flow*, *shear stress* (τ) pada lapisan fluida dengan jarak y dari plat tetap, dapat dirumuskan:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.6)$$

Dimana $du/dy = v/h$ adalah gradient kecepatan. *Shear/resisting force* (F) pada bottom surface dari plat yang bergerak adalah:

$$F = \tau A = \frac{\mu A v}{h} \quad (2.7)$$

Dimana A adalah *surface area* dari plat yang bergerak, maka F dapat dirumuskan:

$$F = c v \quad (2.8)$$

Sehingga, *damping constant* dapat dirumuskan:

$$c = \frac{\mu A}{h} \quad (2.9)$$

2.3 Konsep Elektromagnetik dan Sistem Elektromekanik

Mayoritas perangkat *electromechanical* mengandung kabel-kabel yang mengalirkan arus dan dapat berpindah-pindah disekitar medan magnet. Pada hukum-hukum fisika yang menentukan *electromechanical coupling* dengan tipe tersebut menyatakan (1) sebuah kabel berarus yang terdapat didalam medan magnet akan mempunyai sebuah gaya yang diberikan padanya, dan (2) sebuah tegangan akan diinduksi ke kabel yang bergerak relatif terhadap medan magnet. Variabel-variabel yang dibutuhkan dalam pemodelan tersebut adalah sebagai berikut:

- f_e , gaya pada konduktor (N)
- v , kecepatan konduktor terhadap medan magnet (m/s)
- l , panjang konduktor dalam medan magnet (m)
- Φ , flux magnet (Wb)
- \mathcal{B} , densitas flux dalam medan magnet (Wb/m²)
- i , arus dalam konduktor (A)
- e_m , arus yang diinduksikan dalam konduktor (V)

Variabel-variabel tersebut adalah dalam satuan skalar. Namun, untuk kasus umum akan diberikan empat buah satuan berikut sebagai vektor yaitu f_e , v , l , dan \mathcal{B} . Gaya pada sebuah konduktor dalam panjang yang terdiferensial dl membawa arus i dalam sebuah medan magnet dengan densitas flux \mathcal{B} adalah:

$$df_e = i(dl \times \mathcal{B}) \quad (2.10)$$

cross pada (1) menyatakan produk vektor *cross*. Untuk mendapatkan total gaya listrik yang diinduksikan f_e , persamaan (2.10) harus diintegrasikan sepanjang konduktor. Dalam pengaplikasiannya, kabel-kabel tersebut dapat berupa sebuah konduktor lurus yang tegak lurus terhadap medan magnet *unidirectional* atau konduktor melingkar dalam medan magnet

radial. Dalam kasus lain, panjang yang terdiferensial dl akan tegak lurus terhadap *uniform flux density* \mathcal{B} , dan kemudian (2.10) akan disederhanakan menjadi hubungan skalar seperti berikut:

$$f_e = \mathcal{B}li \quad (2.11)$$

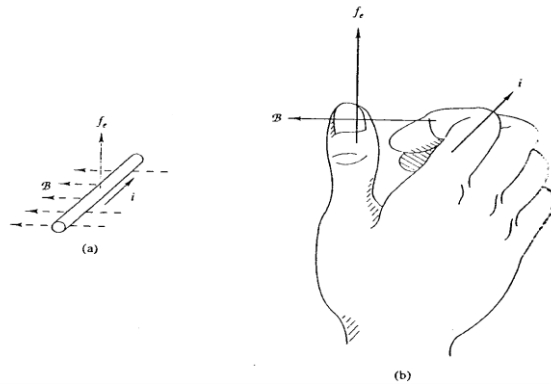
dimana arah gaya adalah tegak lurus terhadap kabel dan medan magnet. Hal tersebut dapat ditemukan pada aturan kaidah tangan kanan seperti pada gambar 2.4 dimana jari telunjuk menunjukkan arah positif arus (i), jari sisanya yang berbelok menunjukkan arah positif medan magnet (\mathcal{B}), dan ibu jari menunjukkan arah positif gaya (f_e). Disebelahnya ditunjukkan arah-arahan gaya tersebut pada sebuah batang konduktor.

Untuk mendapatkan voltase yang diinduksikan pada sebuah konduktor terhadap panjang yang terdiferensial dl dengan kecepatan v dalam sebuah medan magnet \mathcal{B} adalah sebagai berikut:

$$de_m = (v \times \mathcal{B}) \cdot dl \quad (2.12)$$

dimana dot menunjukkan produk skalar, atau produk dot dengan notasi vektor. Total voltase yang diinduksikan ke konduktor diperoleh dari mengintegrasikan persamaan (2.12) diantara ujung-ujung konduktor. Dalam prakteknya, tiga buah vektor pada persamaan (2.12) akan saling tegak lurus, sehingga hasil integrasi (2.12) menghasilkan hubungan skalar sebagai berikut:

$$e_m = \mathcal{B}lv \quad (2.13)$$

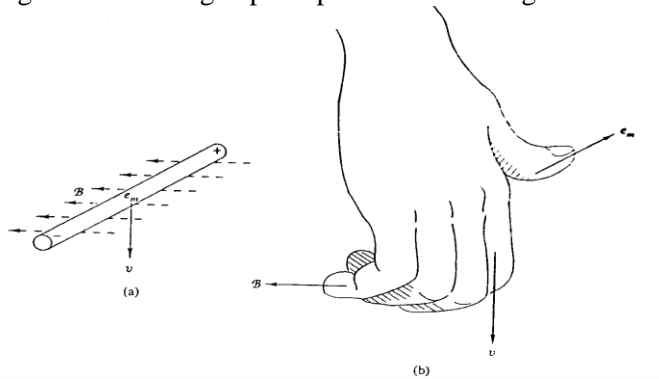


Gambar 2.4 Aturan kaidah tangan kanan untuk gaya pada sebuah konduktor^[1]

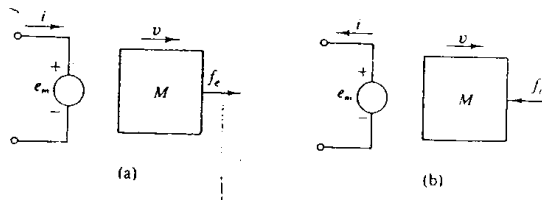
Dapat ditemukan pada aturan kaidah tangan kanan seperti pada gambar 2.5(b) dimana jari telunjuk menunjukkan arah positif *velocity* (i), jari sisanya yang berbelok menunjukkan arah positif medan magnet (B), dan ibu jari menunjukkan arah positif arus (e_m) akibat voltase induksi. Dalam gambar 2.5(a) sebuah batang konduktor terlihat bergerak ke bawah dalam sebuah medan magnet yang positif ke arah kiri. Jika konduktor merupakan bagian dari sebuah sirkuit sempurna tanpa sumber eksternal, arus akan mengalir menuju arah kedalam halaman buku.

Berdasarkan gambar 2.4, arus tersebut akan menyebabkan konduktor terkena gaya keatas yang bertolak belakang dengan gerak kebawah. Persamaan (2.11) dan (2.13), yang mendeskripsikan gaya dan voltase induksi dengan kabel yang bergerak tegak lurus pada medan magnet, dapat dimasukkan dalam contoh skema dari sistem *translational electromechanical* seperti pada gambar 2.6. Gaya dari voltase terinduksi di representasikan oleh sebuah sumber pada sirkuit elektris, dimana gaya induksi magnetik mempengaruhi massa M tempat konduktor berada. Tanda polaritas yang benar untuk e_m dan arah referensi untuk f_e dapat ditentukan dengan melihat kondisi spesifiknya, namun pada

gambar tersebut menunjukkan dua buah kombinasi dari referensi arah yang konsisten dengan prinsip konservasi energi.



Gambar 2.5 Aturan kaidah tangan kanan untuk voltase terinduksi pada konduktor yang bergerak ^[1]



Gambar 2.6 Representasi dari sistem *translational mechanical*;
(a) alur daya Elektrikal-Mekanikal, (b) alur daya Mekanikal-Elektrikal ^[1]

Pada gambar 2.6(a), polaritas dari sumber elektris menggambarkan seolah-olah daya diserap dari sisa-sisa oleh sirkuit saat e_m dan i positif. Begitu juga saat f_e dan v positif, daya akan di transfer ke bagian sistem *mechanical*. Sebaliknya, daya akan mengalir dari bagian *mechanical* ke *electrical* saat seluruh empat variabel positif. Untuk mendapatkan besar daya yang terdapat pada mekanisme penghubungan *mechanical-electrical* adalah

$$P_e = e_m \cdot i = (Blv)i \quad (2.14)$$

dan untuk *electrical-mechanical* adalah,

$$P_m = f_e \cdot v = (Bli)v \quad (2.15)$$

dimana, $P_m = P_e \quad (2.16)$

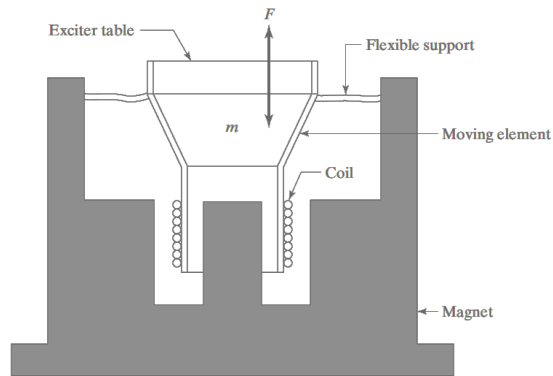
yang menyatakan bahwa daya apapun yang dikirimkan ke mekanisme penghubungan dalam bentuk listrik akan dialirkan tanpa pengurangan ke bagian *mechanical*. Tentunya sistem praktikal apapun akan memiliki kerugian oleh hambatan konduktor dan gesekan antara elemen mekanika yang bergerak. Walaupun begitu, elemen disipatif apapun dapat dimodelkan secara terpisah oleh sebuah hambatan dalam sirkuit listrik atau oleh sebuah elemen *viscous-friction* yang mempengaruhi sebuah massa. Dalam kata lain, dapat didemonstrasikan dari gambar 2.6, daya mekanikal yang bersumber dari gaya f_e ditransmisikan ke elemen elektrik apapun dan berhubungan sepanjang e_m ^[1].

2.4 *Electrodynamic Shaker*

Electrodynamic shaker pada umumnya digunakan sebagai alat untuk *modal analysis*. *Modal Analysis* didefinisikan sebagai proses untuk menunjukkan modal parameter dari sistem baik melalui pendekatan analitis atau eksperimental. Modal parameter meliputi frekuensi natural, rasio redaman, *peak response magnitude*, serta *mode shape* atau modus getar. *Mode shape* adalah bentuk struktur ketika bergetar pada frekuensi natural. Sementara itu, frekuensi natural adalah frekuensi dari sistem yang bergetar secara bebas.

Alat uji getar listrik adalah sebuah *electrodynamic transducer* yang terdiri dari kumparan magnet yang melekat pada elemen penggerak dan struktur magnet dengan celah kecil tempat magnet bergerak. Struktur magnet dirancang untuk memberikan medan magnet yang kuat untuk dapat bergerak diantara celah.

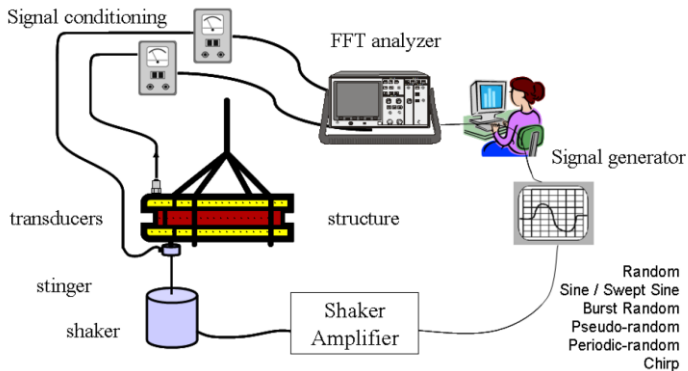
Sehingga ketika arus mengalir dalam kumparan, akan timbul gaya terhadap kuat arus dan medan magnet tersebut. *Modal shaker* pada umumnya menggunakan magnet permanen berkekuatan tinggi untuk mengeksitasi gaya dibandingkan menggunakan kumparan medan (*field coil*). Arus AC (*alternating current*) yang mengalir pada kumparan menyebabkan elemen penggerak pada *shaker* bergerak naik dan turun, memberikan gaya terhadap membran *shaker* berdasarkan input yang diberikan ^[2].



Gambar 2.7 Gambar skematik *electrodynamic shaker* secara umum ^[1]

Shaker tersebut dapat menghasilkan hingga gaya 30.000 N, perpindahan 25 mm, dan *range* frekuensi 5-20 kHz ^[1]. *Electrodynamic shaker* berfungsi memberikan *output* berupa gaya yang sebanding dengan arus yang terdapat pada kumparannya. Alat ini digunakan pada berbagai kegiatan seperti pada evaluasi produk, analisa tegangan, analisis modal, dan uji *squeak-and-rattle*. *Shaker* diberikan input berupa sinusoidal, random, atau *transient signals* tergantung oleh pengaplikasiannya. *Shaker* biasanya digerakkan oleh sebuah *audio-frequency power amplifier* dan menggunakan *loop* terbuka (mayoritas dalam *modal testing*) atau dengan *closed-loop* dimana input untuk *driving amplifier* adalah *servo-controlled*

untuk mencapai gerakan yang diinginkan pada benda yang diujikan [11].



Gambar 2.8 *Modal testing* secara umum dengan *electrodynamic shaker* [12]

Pada instalasi pengujian analisis modal terdapat beberapa komponen alat tes dan pengukuran disekitar struktur uji. Transduser dinamis biasanya digunakan untuk mengukur input berupa gaya eksitasi dan hasil respon getaran. Hasil *Frequency Response Function* (FRF) yang diperoleh oleh sistem pemerolehan data akan disimpan untuk proses-proses selanjutnya seperti perhitungan, pengurangan data, *curve fitting*, dan ekstraksi mode. Gambar 2.8 menjelaskan instalasi pengujian analisis modal dengan *electrodynamic shaker* secara umum. *Multichannel dynamic signal analyzers* (DSA) dibutuhkan sebagai *signal generator* untuk menggerakkan sistem *shaker* dan memberikan eksitasi mekanis terhadap struktur uji. Sebagian besar DSA sekarang ini memudahkan instalasi dalam pengujian analisis modal karena sistem tersebut sudah termasuk *signal conditioning* dan generator, modal *software*, beserta FFT (*Fast Fourier Transform*) analyzer. *Modal shaker* pada zaman sekarang lebih mudah dalam penginstalasian dan ringan untuk dibawa berpindah-pindah tempat [2].

Sistem kerja pada *electrodynamic shaker* dapat dianalogikan seperti pada mikrofon yaitu sistem *electromechanical* yang mempunyai gerakan translasi. Namun, sistem kerja pada *electrodynamic shaker* merupakan kebalikan dari mikrofon. Dimana jika pada mikrofon, terjadi perubahan energi dari elektrik ke mekanik, sedangkan pada *electrodynamic shaker* terjadi perubahan energi mekanik ke elektrik.

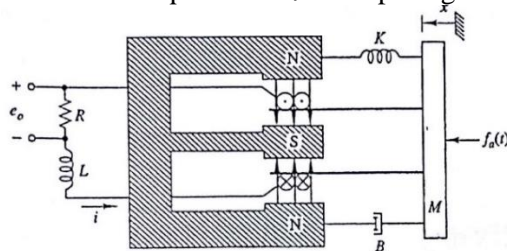
Mikrofon merupakan salah satu transduser (perangkat yang mengubah energi dari satu bentuk ke bentuk lainnya) dimana mikrofon mengubah energi akustik (gelombang suara) menjadi energi listrik (sinyal audio). Ada berbagai tipe mikrofon dimana masing-masing tipe menggunakan metode yang berbeda dalam mengonversi energi, namun semua tipe mikrofon tersebut memiliki satu kesamaan yaitu diafragma. Diafragma (*diaphragm*) merupakan sebuah material tipis (berupa kertas, plastik atau aluminium) yang bergetar ketika terkena gelombang suara. Pada mic genggam yang umum seperti pada gambar di bawah ini, diafragma terletak di dalam kepala mikrofon ^[3].



Gambar 2.9 Model fisik mikrofon ^[3]

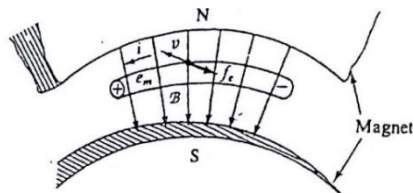
Ketika diafragma bergetar, komponen lain dalam mikrofon ikut bergetar. Getaran ini dikonversi menjadi arus listrik yang kemudian menjadi sinyal audio. Adapun, dalam sistem audio, *loudspeaker* (pengeras suara) juga termasuk transduser yang berfungsi mengubah energi listrik kembali menjadi energi akustik (energi gerak) yaitu kebalikan sistem mikrofon, dimana energi

gerak pada mikrofon dan *loudspeaker* (pengeras suara) adalah sama yaitu gerak translasi seperti ditunjukkan pada gambar 2.9.

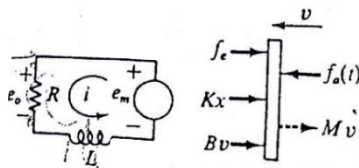


Gambar 2.10 Model skematik mikrofon ^[1]

Langkah pertama untuk memodelkan mikrofon yaitu memodelkan mikrofon pada *mechanical* dan *electrical* model. Hal yang dilakukan pertama kali yaitu menentukan arah positif dari f_e , Arah f_e ditentukan sesuai aturan kaidah tangan kanan yang telah dibahas pada sub bab sebelumnya. Adapun, arah f_e menurut gambar diatas menurut kaidah tangan kanan akan bernilai positif.



(a)



(b)

Gambar 2.11 (a) Hubungan bagian dari koil tunggal (b) Diagram yang digunakan untuk analisa ^[1]

Gambar 2.11(a) menunjukkan bagian atas dari kumparan tunggal sebuah koil seperti yang terlihat dari diafragma yang ditinjau terhadap magnet. Karena *flux* (fluks) mengarah kebawah dari kutub utara ke kutub selatan dan arus mengarah ke kiri, menurut aturan tangan kanan hal tersebut menunjukkan bahwa arah positif f_e menuju ke kumparan. Karena arah kecepatan menjauhi kumparan, aturan tangan kanan digambarkan pada gambar 2.11(b) menunjukkan bahwa arah positif dari tengangan terinduksi sama dengan arus. Adapun, kita bisa mencapai kesimpulan yang sama dengan memeriksa bagian lain dari kumparan. Sehingga dapat digambar *free body diagram* dari sistem sesuai pada gambar 2.11(b). Karena kumparan dan garis-garis fluks di celah udara adalah simetri radial, seluruh panjang kumparan tegak lurus terhadap fluks. Sehingga,

$$\begin{aligned} f_e &= \alpha i \\ e_m &= \alpha v \end{aligned} \quad (2.17)$$

dimana, $\alpha = 2\pi a N \beta$ adalah *electromechanical coupling coefficient* untuk sistem. Sehingga, didapatkan persamaan gerak dari sistem yaitu:

$$m\dot{v} + Bv + kx = -\alpha i + fa(t) \quad (2.18)$$

Kemudian, ditemukan persamaan pada sistem elektik dari aplikasi Hukum Kirchhoff's *voltage*, sebagai berikut:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = \alpha v \quad (2.19)$$

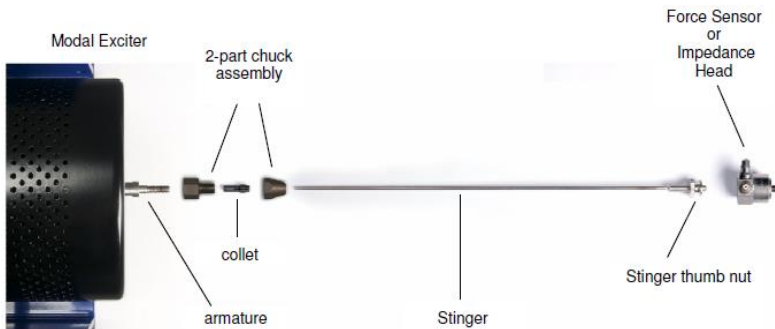
Sistem mempunyai tiga elemen energi penyimpanan yang independen (L, K, M), Sehingga ditemukan *state variable*. Sehingga, *state variable* yang dapat ditetapkan yaitu i , x , v . Dari penulisan kembali rumus di atas, diperoleh *state variable equations* sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \frac{di}{dt} &= \frac{1}{L} (-Ri + \alpha v) \\
 \dot{x} &= v \\
 \dot{v} &= \frac{1}{M} [\alpha i - kx - Bv + fa(t)]
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

2.4.1 *Stinger*

Pada pengujian analisis modal dibutuhkan perhitungan input gaya terhadap struktur dan output akselerasi. Saat *shaker* digunakan sebagai sumber eksitasi, dibutuhkan koneksi antara membran penggerak pada *shaker* dengan struktur uji melalui *force transducer*. Biasanya *shaker* tersebut dilekatkan ke objek uji melalui sebuah batang langsing pendek yang biasa disebut *stinger*. *Stinger* digunakan untuk mengisolasi *shaker*, mengurangi massa tambahan, dan menyalurkan gaya ke objek uji sepanjang arah axial dari *stinger*. Hal tersebut membuat dapat diaturnya arah gaya yang diberikan oleh *shaker*.

Batang tersebut kaku terhadap arah eksitasi namun fleksibel ke arah lainnya. *Stinger* tersebut biasanya berupa batang langsing sirkular yang memiliki *high transverse flexibility* dan *high axial stiffness*^[12].

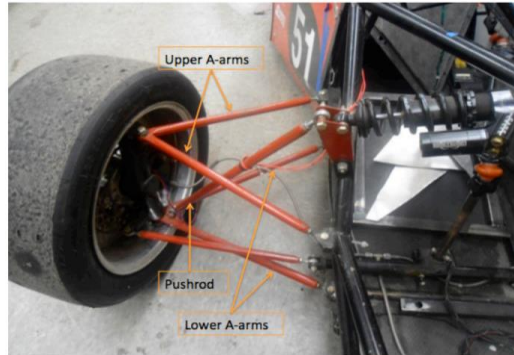


Gambar 2.12 Pemasangan *stinger* pada *electrodynamic shaker*^[2]

2.5 *Double Wishbone Suspension System (A-Arm)*

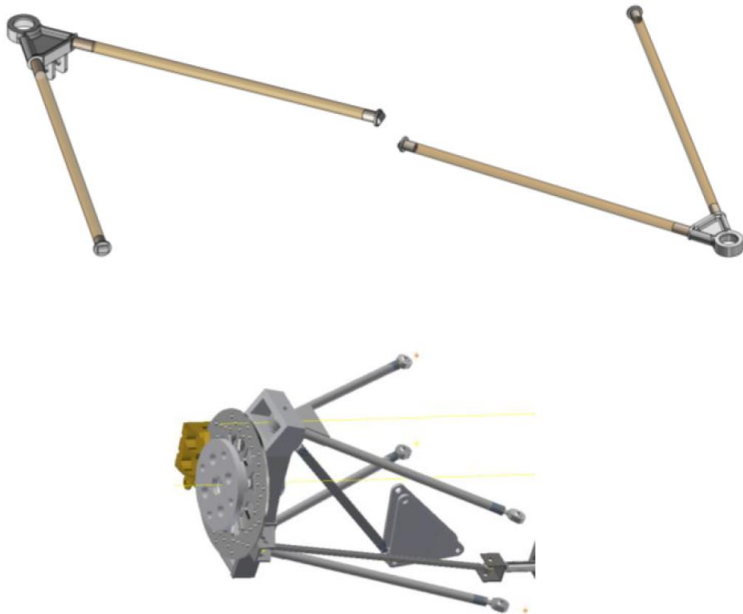
Sistem suspensi adalah berupa pegas, *shock absorber* dan *linkage* yang menghubungkan kendaraan ke roda dan memungkinkan gerak relatif antara roda dan bodi kendaraan. Selain itu, peran terpenting yang dimainkan oleh sistem suspensi adalah menjaga agar roda tetap terhubung dengan jalan sepanjang waktu. Salah satu fungsi sistem suspensi adalah menjaga roda pada *steer* dan *camber* yang tepat ke permukaan jalan dan harus bereaksi terhadap berbagai gaya yang bertindak dalam kondisi dinamis. Gaya tersebut termasuk gaya longitudinal, (akselerasi dan pengereman), gaya lateral (gaya menikung) dan pengereman serta torsi mengemudi. Suspensi harus menolak efek gulingan terhadap *chassis* dan menjaga kestabilan roda pada jalan yang tidak rata dengan mengisolasi *chassis* dari kekasaran jalan^[13].

Sebuah mobil balap formula adalah sebuah bentuk yang disederhanakan dari mobil balap *Formula One* yang didesain dan dibangun oleh mahasiswa-mahasiswa universitas untuk keperluan kompetisi seperti *FSAE*, *Supra SAE*, dan *Formula Student*. Suspensi berperan besar saat mobil balap melaju. Umumnya, dalam sebuah mobil balap, *double wishbone suspension* dengan *pullrod* ataupun *pushrod* digunakan untuk memudahkan dalam mendesain dan memperingan bobot komponen yang digunakan. Desain suspensi mobil balap merupakan hal yang rumit, maka itu diperlukan prosedur yang jelas.



Gambar 2.13 Sistem suspensi dengan A-Arm^[4]

Double wishbone suspension system terdiri dari dua lengan kontrol lateral (lengan atas dan lengan bawah) biasanya dengan panjang yang tidak sama serta dengan koil di atas pegas dan *shock absorber*. Biasanya terkenal untuk suspensi depan dan banyak digunakan pada kendaraan penggerak roda belakang. Desain geometri *double wishbone suspension system* beserta desain pegas memainkan peran yang sangat penting dalam menjaga kestabilan kendaraan. Sistem suspensi jenis ini memberikan peningkatan keuntungan *camber* yang meningkat sampai ke perjalanan penuh seperti *Macpherson Strut*. Mereka juga memungkinkan penyesuaian parameter ban yang mudah seperti *camber*. *Double wishbone suspension system* mempunyai karakteristik dinamis yang superior serta kemampuan penanganan beban yang baik^[13].

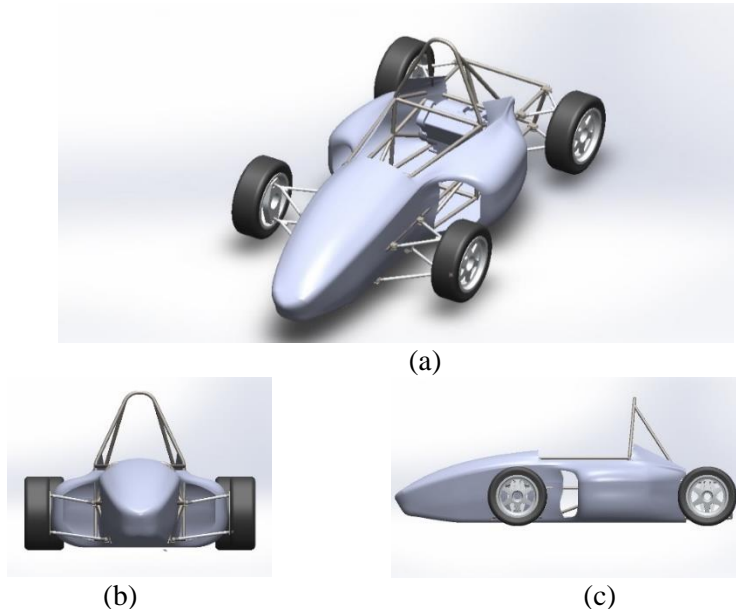


Gambar 2.14 *Upper dan lower arm* dari sistem suspensi bagian depan beserta susunannya ^[5]

2.5.1 Sistem Suspensi pada *Sapuangan Speed*

Institut Teknologi Sepuluh Nopember merupakan salah satu peserta kompetisi *Student Formula Japan* yang diselenggarakan oleh *Japan Society of Automotive Engineer* dan sudah empat kali mengikuti kompetisi mobil formula tersebut. Mobil atau kendaraan yang dikompetisikan akan dihadapkan pada berbagai kondisi diantaranya adalah tes *skidpad*, *acceleration*, *autocross*, dan *endurance* ^[9]. Suspensi berperan penting saat mobil balap melaju. Dalam mobil *Sapuangan Speed*, *double wishbone suspension* dengan *pullrod* ataupun *A-Arm pushrod* digunakan untuk memudahkan dalam mendesain dan memperringan bobot komponen-komponen yang digunakan ^[10]. *A-Arm* akan diuji dan

dianalisa terlebih dahulu untuk menghindari terjadinya kerusakan lebih lanjut akibat menahan beban *body* kendaraan.



Gambar 2.15 Mobil *Sapuangin Speed* (a) isometrik (b) tampak depan (c) tampak samping

2.6 Penelitian Terdahulu

Pada tahun 2016, Haidir Ali Murtadlo ^[5] menganalisis tentang kekuatan dan umur *fatigue* menggunakan metode *finite element* dengan bantuan komputer terhadap desain A-arm *carbon fiber tube* pada mobil formula *Sapuangin Speed*, sehingga didapat desain yang tepat untuk A-arm pada mobil *Sapuangin Speed* dan mampu melalui tes statis maupun dinamis pada ajang kompetisi *Student Formula Japan*. Pada pemodelan menggunakan dua metode pengujian yaitu pemodelan statis dengan menggunakan gaya vertikal dari massa kendaraan itu sendiri, metode yang kedua dengan menggunakan gaya dinamis dari beberapa tahapan

kompetisi student formula japan yang berupa *skidpad*, *brake test*, dan *acceleration*.



Gambar 2.16 Susunan *Front Upper A-arm carbon tube* ^[5]

Beban vertikal didapat dari menjumlahkan massa-massa dari komponen mobil yang masuk pada kategori *sprung masses*. Dengan rincian sebagai berikut:

Tabel 2.1 *Unsprung Masses* ^[5]

Komponen No.	Nama beban	Massa (kg)	jumlah	massa (kg)	Berat (N)
1	<i>Roda+ velg</i>	9.8	4	39.2	384.552
2	<i>Upright</i>	1.2	4	4.8	47.088
3	Bracket	0.2	4	0.8	7.848
4	<i>Hub</i>	0.7	4	2.8	27.468
5	<i>Disk Brake</i>	0.7	4	2.8	27.468
6	<i>Caliper</i>	0.2	4	0.8	7.848
7	<i>Bearing</i>	0.4	8	3.2	31.392
Jumlah		54.4		533.664	

Dengan besar percepatan gravitasi sebesar 9.81 m/s²

$$W_{sprung} = (W_{mobil} + W_{driver}) - W_{unsprung}$$

$$W_{sprung} = 3041,1 \text{ N} - 533,664 \text{ N}$$

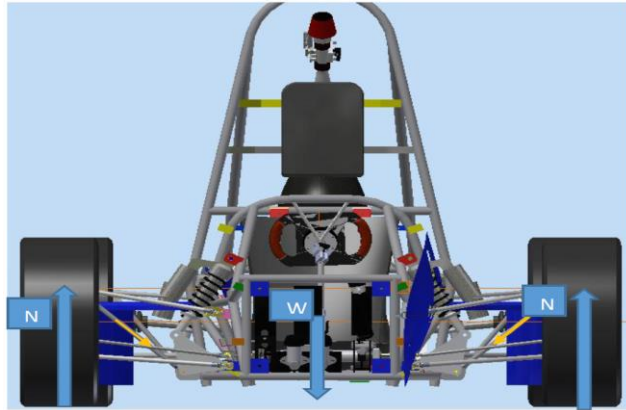
$$W_{sprung} = 2507,436 \text{ N}$$

Material yang digunakan sesuai dengan jenis material yang dimiliki oleh Tim Sapuangan. Variasi susunan sudut layer terluar yang digunakan adalah sebesar 0° . Material properties yang digunakan adalah dari carbon fiber dengan rincian seperti tabel dibawah.

Tabel 2.2 Material *properties* dari *carbon fiber* yang digunakan (*Kyoto-carbon.corp*)

Carbon Fiber Properties		unit
Tensile Strength	3310	Mpa
Tensile Modulus	240	Gpa
Strain	1.6	%
Density	1.78	g/cm ³
Yield	220	g/1000m
Sizing Type and Amount	1.0 – 1.5	%
Elastic Modulus	241	Gpa
Percent Elongation	1.8	%
Poison Ratio	0.1	

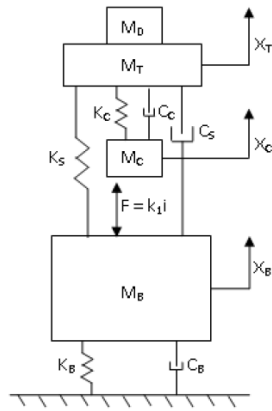
Pada tahapan *skidpad*, mobil akan bermanuver pada lintasan berbentuk angka 8 dengan diameter masing-masing lintasan sebesar 15.25 m dan dengan kecepatan maksimum sebesar 30 km/jam atau 8.35 m/s. Gaya sentrifugal, momen guling dan momen pitching dicari dengan data acuan hasil dari *skidpad event* tahun lalu pada SFJ. Yaitu dengan diameter lingkaran lintasan sebesar 15.25 m yang ditempuh selama 5.732 s, didapat kecepatan rata-rata dari mobil sebesar 30km/jam atau sebesar 8.35 m/s.



Gambar 2.17 *Free body diagram* gaya normal roda tampak depan
[5]

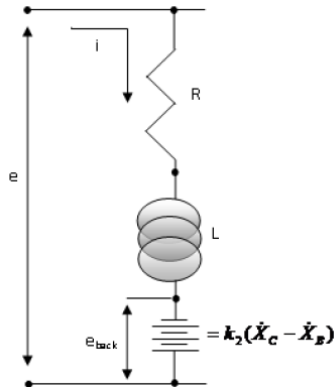
Berdasarkan perhitungan dari fenomena *maneuver* mobil, didapatkan bahwa gaya-gaya pengujian pada simulasi adalah, besarnya gaya centrifugal yang timbul ketika mobil melakukan manuver belok sebesar 2834.6 N. Selain itu saat pengereman dibutuhkan gaya pengereman untuk menghentikan mobil sampai diam sebesar 1594.65 N. Dari gaya-gaya tersebut diperoleh deformasi sebesar 0.85837 mm ketika skidpad, dan 0.78343 mm ketika pengereman.

Pada tahun 2013, Daryl Hickey, Steve Sewell, William Mortel, Ibrahim Esat ^[14] melakukan studi tentang *electrodynamic shaker*. Dimana mereka memodelkan *electrodynamic shaker* pada *free body diagram* seperti gambar 2.18.



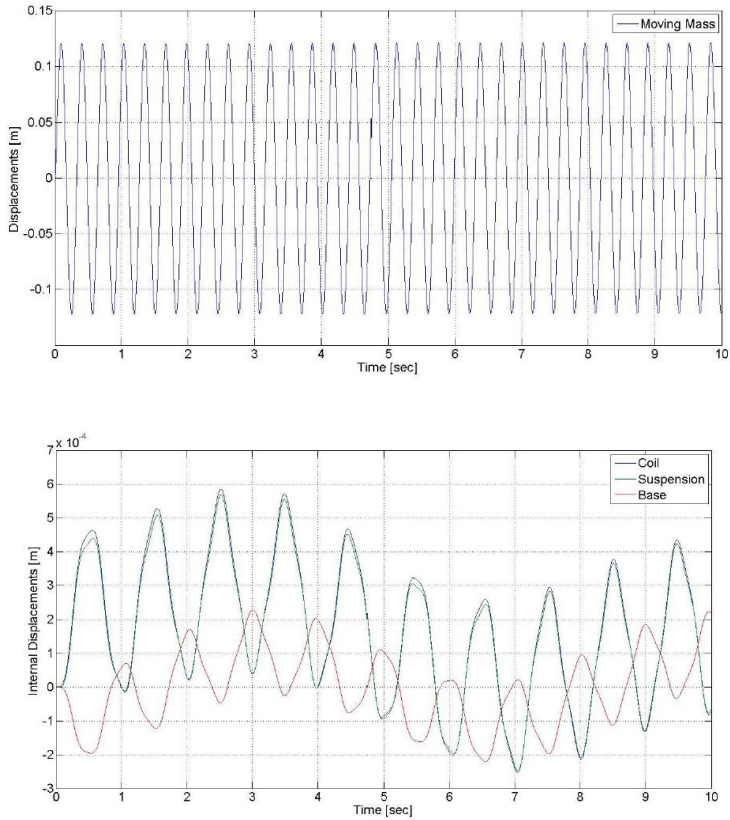
Gambar 2.18 *Free Body Diagram Electrodynamic Shaker*
[14]

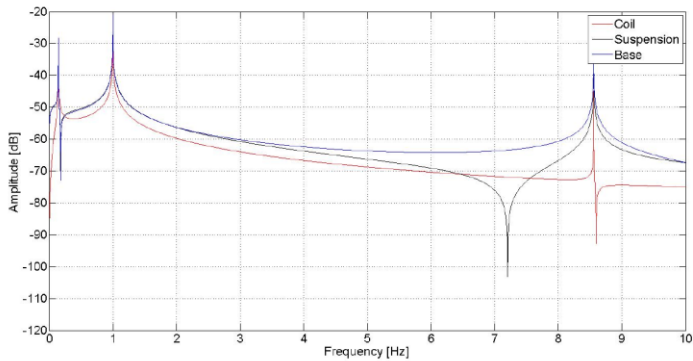
Dimana gaya eksitasi pada *electrodynamic shaker* tersebut didapat dari *electrical components* dengan *free body diagram* seperti pada gambar 2.19.



Gambar 2.19 *Free Body Diagram Electrical Components* [14]

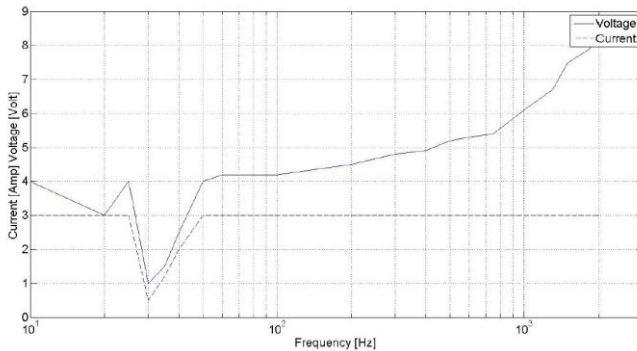
Kemudian didapatkan respon dari sistem dengan empat derajat kebebasan (DoF) tersebut dengan *Ordinary Differential Equations* (ODE) dan Runga-Kutta *Integration* pada Gambar 2.20 (a), (b), (c).





Gambar 2.20 (a) *Time Domain Analysis* untuk perpindahan dari *movable mass* (MD, MF). (b) *Time Domain Analysis* untuk perpindahan dari *internal mass structure*. (c) *Frequency Domain Analysis* untuk Mengidentifikasi *Modes of Vibration* ^[14]

Analisis hasil studi tersebut menyatakan bahwa hal yang paling penting dari *electrodynamic shaker* adalah dalam plot frekuensi. Sebagian (tidak semua) produsen *electrodynamic shaker* memberikan rentang frekuensi optimal operasi untuk *shaker* mereka. Hal ini didasarkan pada kondisi resonansi yang ditunjukkan pada Gambar 2.20. Salah satu model utama kegagalan dari shaker adalah *overload* tegangan yang mengarah ke panas berlebihan di kumparan yang menyebabkan *blistering of the windings*, dengan demikian menjaga tegangan untuk minimum lebih disukai dan mengetahui frekuensi yang memerlukan daya minimum untuk operasi penting untuk memperpanjang umur dari perangkat. Grafik kinerja shaker diberikan pada gambar 2.21. Grafik tersebut menjelaskan bahwa tegangan dengan frekuensi tertentu dan arus yang dibutuhkan untuk shaker adalah minimal dan seperti daya yang diperlukan.



Gambar 2.21 Kinerja *Shaker*^[14]

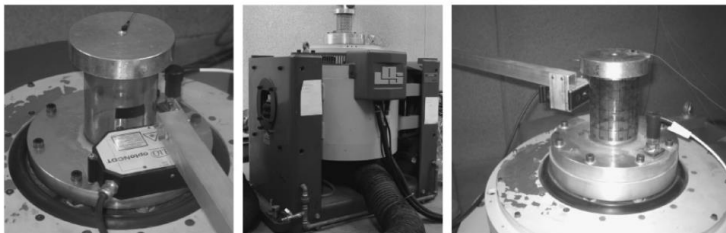
Pada tahun 2015, Daniel M. Harris dan John W.M. Bush^[7] membahas tentang pemilihan *stinger* yang sesuai untuk sebuah *electrodynamic shaker*. *Stinger* digunakan dalam pengujian modal untuk memungkinkan transmisi gaya aksial yang efisien ke struktur uji serta meminimalkan hambatan dan momen lateral pada titik penempelan. Secara umum, kekakuan non-aksial *stinger* harus jauh lebih kecil daripada struktur uji untuk menghindari pengaruh krusial pada fungsi respons frekuensi yang diukur (FRF).

Secara khusus, kekakuan aksial yang tinggi (untuk transmisi kekuatan murni dalam arah aksial), kekakuan lateral dan momen yang rendah (relatif terhadap bantalan *shaker* dan udara), dan tidak ada resonansi *stinger* merupakan asumsi-asumsi yang digunakan. *Stinger* berguna sebagai sekering mekanis antara *shaker* dan beban sehingga gaya aksidental yang berlebihan oleh sistem hanya akan menyebabkan kegagalan pada *stinger* yang murah, dengan cepat memisahkan *shaker* dari beban. Kemungkinan resonansi aksial atau longitudinal diperhitungkan. *Uniform rod* mengalami deformasi seperti pegas linier sebagai respons terhadap beban aksial, dengan konstanta pegas tertentu.

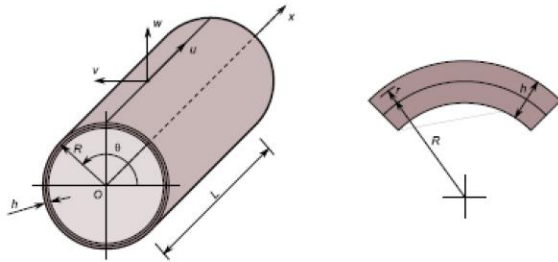
Tabel 2.3 Parameter yang digunakan pada *stinger*^[7]

Symbol	Meaning	Value
E	Young's modulus	205GPa
ρ	Density	7830 kg/m ³
σ_e	Endurance limit	515MPa
d	Diameter	1.6mm
L	Length	60mm
$A = 1/4 \pi d^2$	Cross-sectional area	2.0 mm ²
$I = 1/64 \pi d^4$	Area moment of inertia	0.32 mm ⁴
$k = 12EI/L^3$	Lateral stiffness	3.7 N/mm

Pada tahun 2014, Francesco Pellicano dan Marco Barbieri^[8] melakukan penelitian untuk mengetahui karakteristik dinamis dari struktur yang kompleks yaitu *Cylindrycal Shells*. Penelitian dilakukan karena aplikasi penggunaan struktur seperti shell digunakan pada beberapa bidang , seperti pada *Aerospace*, Nuklir, Sipil, Otomotif, Mekanik, dan Energi. Penelitian dilakukan dengan menggunakan *electrodynamic shaker* yang kemudian dilakukan validasi secara mendalam dengan menggunakan *The Non-Linear Sanders–Koiter Theory*, *Non Linear Partial Differential Equations*, *Linear Ordinary Differential Equations*. Adapun, gambar 2.22 merupakan instalasi pengujian menggunakan *electrodynamic shaker*.

Gambar 2.22 Instalasi Pengujian *Cylindrycal Shells* dengan Menggunakan *Electrodynamic Shaker*^[8]

Kemudian, pada gambar 2.23 merupakan gambar pemodel fisik dari *shell*.



Gambar 2.23 Pemodelan Fisik *Shells* [8]

Di bawah ini merupakan data parameter dari *shaker* dan *shell-disk* yang digunakan dalam percobaan.

Tabel 2.4 Parameter *shaker* [8]

k_b [N/m]	c_b [Ns/m]	m_0 [kg]	\mathcal{L} [H]	\mathcal{R} [Ω]	k_c [N/A]	P_{amp}	b_{amp} [s]
93000	0.534	14.2	0.51×10^{-3}	1.06	121.22	-115	0.4×10^{-4}

Keterangan :

k_b adalah nilai kekakuan dari sambungan pada elemen *shaker* yang bergerak (N/m)

C_b adalah koefisien redaman *viscous*(Ns/m)

m_0 adalah massa dari elemen *shaker* yang bergerak (kg)

\mathcal{L} adalah induktansi kumparan (H)

\mathcal{R} adalah resistansi kumparan (Ω)

k_c adalah arus ke gaya konstan (N/A)

P_{amp} dan b_{amp} adalah koefisien karakteristik dari penguat

Tabel 2.5 Parameter *shell-disk* ^[8]

$\rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	ν	$E \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]$	$m_d \text{ [kg]}$	$R \text{ [m]}$	$L \text{ [m]}$	$h \text{ [m]}$	$\frac{R}{h}$	$\frac{L}{R}$
1366	0.4	46×10^8	0.82	43.88×10^{-3}	96×10^{-3}	0.25×10^{-3}	176	2.19

Keterangan :

ρ adalah massa jenis dari *shell* ($\frac{kg}{m^3}$)

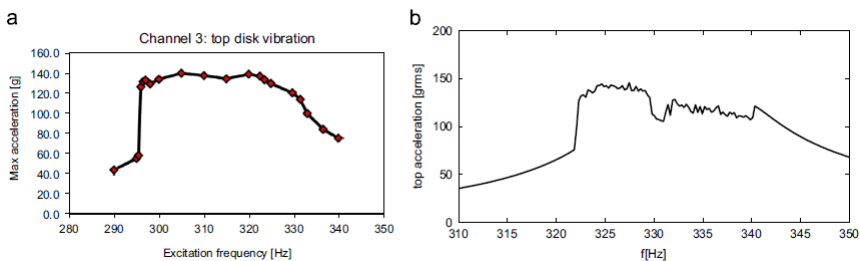
ν adalah *poisson ratio*

E adalah konstanta elongasi dari *shell* ($\frac{N}{m^2}$)

m_d adalah massa *disk* (kg)

L adalah panjang *shell* (m)

h adalah ketebalan *shell* (m)



Gambar 2.24 Getaran pada *disk*, dengan percepatan maksimum
(a) Eksperimen dan (b) Simulasi, dengan tingkat eksitasi 0,1 V ^[8]

Fenomena mengenai saturasi getaran pada *disk* dihasilkan dengan hasil yang memuaskan seperti ditunjukkan pada gambar 2.24. Model yang baru dengan penggunaan *disk* melengkapi informasi mengenai perilaku kualitatif dari sistem dan hasil percobaan. Telah dtunjukkan bahwa pada daerah yang tidak stabil, daerah terjadinya respon yang tidak teratur, model yang lama menghasilkan akurasi yang diterima dari amplitudo getaran.

2.7 Referensi *Electrodynamic Shaker* yang Sudah Ada di Pasaran

Pada katalog shaker yang sudah beredar di pasaran seperti *The Modal Shop* terdapat panduan pemilihan modal *shaker* berdasarkan alat yang akan diuji [6]. Pada gambar 2.25 tertera dua buah acuan *shaker* untuk range dari gaya, frekuensi, serta amplitudo yang biasanya dipakai untuk menguji sesuai dengan objek uji. Data pada penelitian Haidir Ali Murtadlo [5] menunjukkan bahwa berdasarkan besaran gayanya, komponen A-Arm dapat diuji menggunakan *The Modal Shop* tipe 2025E. Dimana tipe tersebut memiliki spesifikasi sebagai berikut:



Model Number
2025E

MODAL EXCITER

Revision: C
ECN #

PERFORMANCE

Sine Force		
Natural Air Cooling	lbf pk (N pk)	13 (58)
Max. Displacement		
Continuous pk-ops	in (mm)	0.7 (18)
Mechanical Shocks	in (mm)	0.75 (19)
Frequency Range ¹	Hz	DC-5000
Fundamental Resonance ¹	Hz	>6000
Maximum Velocity	ips pk (m/s pk)	120 (3)
Acceleration		
Bare Table (w/coilset)	g pk	32
0.5 lb (0.23 kg) load	g pk	16
2.5 lb (1.13 kg) load	g pk	8
Maximum Acceleration at Resonance	g pk	200

PHYSICAL

Armature Weight	lb (kg)	0.35 (0.159)
Suspension Stiffness	lbf/in (N/mm)	15 (2.6)
Rated Armature Current		
Natural Cooling	A rms	9
Stray Magnetic Field		
1.5 in (38 mm) above coilset	Gauss	<10
0.5 in (13 mm) from body	Gauss	<15
Dimensions	in (mm) HxWxD	8.65 x 8.82 x 4.25 (220 x 224 x 108)
Shaker Weight (with Trunion)	lb (kg)	13 (6)

RELATED EQUIPMENT:

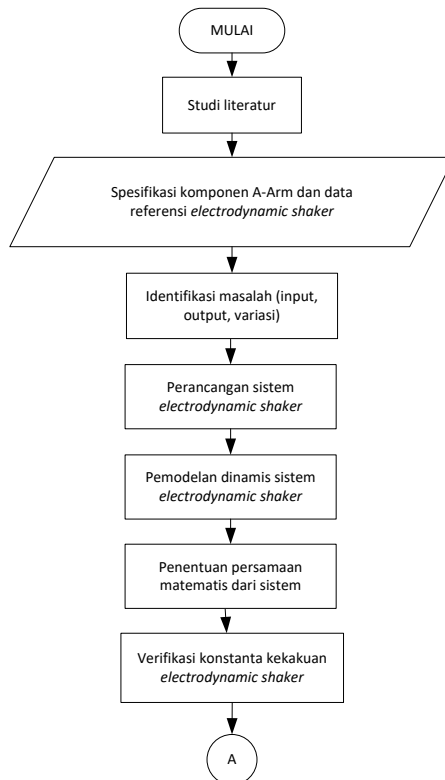
- 2100E21-400 SmartAmp™ Power Amplifier, voltage mode
- 2050E5 Linear Power Amplifier, selectable voltage / current mode
- 2150S12 Modal Stringers, 1/16 in diameter rod with 10-32 threaded end, pack of three
- 2150S12 Modal Stringers, 3/32 in diameter rod with 10-32 threaded end, pack of three
- K2180G Piano Wire Stringer Kit, includes quick disconnect coil adapter

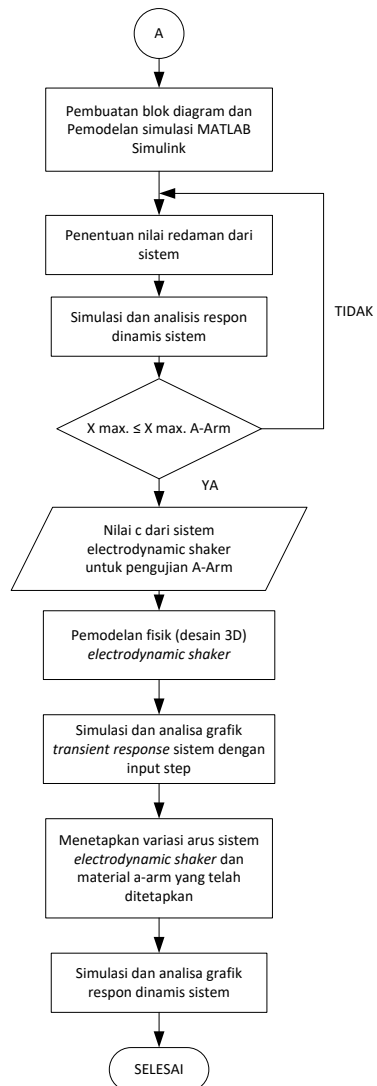
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penulisan tugas akhir ini dilakukan untuk mengetahui nilai redaman dari *electrodynamic shaker* yang sesuai dengan *displacement A-Arm* pada mobil *Sapuangan Speed* dan respon dinamis berupa perpindahan, kecepatan, dan percepatan dari sistem yang telah dirancang. Dalam proses analisis dilakukan beberapa langkah yang ditunjukkan oleh diagram alir pada gambar 3.1.





Gambar 3.1 Diagram alir penyelesaian tugas akhir

3.1.1 Tahap Studi Literatur

Dalam penulisan tugas akhir ini diperlukan referensi-referensi yang dapat menunjang dalam menganalisis rancangan *electrodynamic shaker* untuk pengujian *A-Arm*. Oleh karena itu, dilakukan studi literatur untuk menambah wawasan, pengetahuan, dan landasan mengenai permasalahan yang akan dibahas. Adapun materi dari studi literatur yang mendukung dalam penulisan tugas akhir ini yaitu *forced vibration multi degree of freedom*, *damping constant of a parallel plates separated by viscous fluid*, konsep elektromagnetik dan sistem elektromekanik, *electrodynamic shaker*, *double wishbone suspension system (a-arm)*, pemodelan sistem dinamis, sistem mekanis getaran translasi, serta pembuatan blok diagram pada program MATLAB Simulink. Spesifikasi data serta nilai parameter yang digunakan didapatkan berdasarkan referensi. Referensi untuk studi literatur didapat dari buku, jurnal-jurnal ilmiah, maupun penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan.

3.1.2 Identifikasi Masalah

Setelah itu mengidentifikasi masalah yang ada. Masalah yang diidentifikasi pada penelitian ini ada dua, yaitu input dan output. Input yang diberikan berupa variasi arus, variasi material, dan konstanta redaman. Sedangkan output yang dihasilkan dari penelitian ini adalah respon dinamis yang dihasilkan oleh sistem. Dilakukan perancangan sistem *electrodynamic shaker* dengan sistem translasi yang sederhana agar mudah untuk direalisasikan. Dilakukan simulasi dengan variasi input *step* dan *sinusoidal*. Simulasi dilakukan untuk menemukan konstanta redaman yang sesuai dengan kebutuhan *electrodynamic shaker* untuk pengujian *A-Arm*. Adapun konstanta redaman yang sesuai ditemukan melalui *trial* dan *error* dengan cara variasi nilai yang pada akhirnya ditemukan respon dari simulasi hingga memiliki *displacement* yang sesuai dengan karakteristik *A-Arm* agar alat yang didesain dapat memberikan hasil yang akurat. Setelah ditemukan konstanta

redaman yang sesuai yaitu visualisasi desain rancangan *electrodynamic shaker* yang sesuai untuk pengujian *A-Arm* dalam bentuk 3D yang sesuai dengan nilai c yang didapat serta dilakukan pula analisa grafik respon sistem yang telah didapat. Kemudian dari data blok diagram sistem yang telah ada, dilakukan analisa dengan *step input* untuk mengetahui *transient response* dari sistem. Selain itu juga dilakukan variasi nilai arus dan material *a-arm* lalu menganalisa respon dinamis sistem dari variasi rancangan. Hal tersebut dilakukan untuk mengetahui pengaruh perubahan arus serta material objek uji terhadap rancangan.

3.1.3 Perancangan Sistem *Electrodynamic Shaker*

Electrodynamic shaker yang akan dirancang memiliki sistem translasi dan merupakan sistem yang paling sederhana namun mampu memenuhi kriteria pengujian *modal analysis*. Dengan sistem yang sederhana tersebut diharapkan agar alat ini mudah untuk direalisasikan serta membutuhkan biaya yang lebih sedikit dalam pembuatannya. Cara kerja alat ini adalah dengan mengeksitasi output mekanis berupa gaya translasi ke objek. Kemudian respon yang dihasilkan oleh objek akan dianalisa oleh *signal conditioning, analyzer, dan modal software* untuk diketahui modal parameternya. *Electrodynamic shaker* pada umumnya digunakan sebagai alat untuk *modal analysis*. *Modal Analysis* didefinisikan sebagai proses untuk menunjukkan modal parameter dari sistem baik melalui pendekatan analitis atau eksperimental. Modal parameter meliputi frekuensi natural, rasio redaman, *peak response magnitude*, serta *mode shape* atau modus getar. *Mode shape* adalah bentuk struktur ketika bergetar pada frekuensi natural. Sementara itu, frekuensi natural adalah frekuensi dari sistem yang bergetar secara bebas. Data hasil analisa pada *A-Arm* dibutuhkan untuk kesesuaian saat penyetelan *A-Arm* ke *body* kendaraan.

3.1.4 Pemodelan Sistem Dinamis dan Persamaan Gerak

Pemodelan sistem dinamis dari penelitian ini dibuat beserta objek pengujian yang diinginkan. *Electrodynamic shaker* pada gambar tersebut nantinya akan menghasilkan gerak mekanis secara translasi yang kemudian gerak tersebut digunakan sebagai input pengujian modal analysis. Gerak translasi tersebut dihasilkan oleh gaya eksitasi (gaya elektromagnetik). Adapun gaya eksitasi tersebut terjadi akibat sistem elektrik pada *electrodynamic shaker*. Gaya tersebut dihasilkan oleh medan magnet dari kumparan yang dilewati oleh arus. Setelah membuat pemodelan sistem dinamis, selanjutnya adalah pembuatan persamaan gerak untuk analisa tersebut dengan membangun *free body diagram* dari model fisik yang sudah disederhanakan. Diketahui dari *free body diagram*, didapatkan komponen gaya yang sejenis akan dijumlahkan dengan menggunakan *Hukum Newton*. Setelah itu, persamaan gerak tersebut diubah dalam bentuk *state variable* dengan cara merubah bentuk persamaan kedalam persamaan diferensial ordo satu.

3.1.5 Verifikasi Konstanta Kekakuan *Electrodynamic Shaker*

Pada rancangan *electrodynamic shaker* ini digunakan *fixture* atau *flexible support* pada bagian atas *shaker*. Umumnya digunakan *rubber membrane* pada mayoritas *shaker* yang sudah ada sehingga dengan konstanta kekakuan yang telah tertera pada katalog dilakukan simulasi dengan *Autodesk Inventor software* untuk analisa tingkat keamanan *flexible support*. Hasil analisa dengan *software* dibahas pada sub bab 4.1.

3.1.6 Pembuatan Blok Diagram dan Simulasi MATLAB Simulink dengan Input Sinusoidal

Persamaan *state variable* yang dihasilkan dari pemodelan dinamis kemudian diubah menjadi blok diagram simulasi dengan software MATLAB Simulink. Simulasi ini dilakukan untuk mendapatkan penyelesaian persamaan matematis dari pemodelan sistem *electrodynamic shaker* beserta objek uji. Setelah pembuatan

blok diagram, dilanjutkan dengan simulasi. Simulasi pada pemodelan sistem *electrodynamic shaker* dimulai dengan input yang digunakan berupa gaya sinusoidal dan *step* input, sehingga menghasilkan output berupa displacement pada massa utama (x_1) yang akan menjadi input pada objek uji yang menempel pada massa utama. Output pada objek uji yang dihasilkan adalah displacement (x_2). Kedua pemodelan tersebut menghasilkan respon dinamis dari sistem.

3.1.7 Penentuan Konstanta Redaman

Pada tahap ini ditentukan nilai c (*damping coefficient*) pada *electrodynamic shaker* dengan metode *trial and error* yang nantinya akan digunakan sebagai nilai parameter pada blok diagram sistem yang telah dibuat di MATLAB Simulink.

3.1.8 Analisa Grafik Respon Dinamis dengan Input Sinusoidal

Dari simulasi sistem rancangan *electrodynamic shaker* dengan *input* redaman dari sistem, akan didapat respon dinamis berupa perpindahan, kecepatan, maupun percepatan dari *input* sinusoidal sesuai dengan karakteristik a-arm dengan memodifikasi blok diagram pada Simulink. Grafik yang akan dianalisa yaitu grafik respon perpindahan pada *A-Arm* terhadap waktu (t). Nilai perpindahan a-arm pada grafik perlu disesuaikan dengan perhitungan perpindahan a-arm sebelumnya. Selanjutnya dilakukan evaluasi dan mengambil kesimpulan dari hasil dari respon dinamis.

3.1.9 Desain 3D *Electrodynamic Shaker* yang Sesuai untuk Pengujian *A-Arm* dan Analisa Grafik

Setelah ditemukan nilai c yang sesuai yaitu visualisasi desain rancangan *electrodynamic shaker* yang sesuai untuk pengujian *A-Arm* dalam bentuk 3D yang sesuai dengan nilai yang telah didapat pada tahap sebelumnya. Selain itu, pada tahap ini juga dilakukan analisa grafik sistem dengan nilai c yang sesuai. Dimana

dilakukan analisa dengan perbandingan bagaimana respon sistem ketika diberi input *step* dan input *sinusoidal*. Pemberian input *step* dimaksudkan agar diketahui *transient* respon dari sistem tersebut, yaitu bagaimana respon tersebut stabil/*steady* lagi setelah mendapatkan gangguan. Sedangkan pemberian input *sinusoidal* bertujuan untuk mengetahui *steady state* respon ketika sistem sudah bekerja.

3.1.10 Simulasi MATLAB Simulink dengan Input Step

Setelah perancangan tiga dimensi dan mendapatkan setiap parameternya, dilanjutkan oleh simulasi dengan input *step*. Simulasi dengan input *step* dilakukan untuk mengetahui bagaimana *transient response* pada rancangan sistem *electrodynamic shaker*. Output yang dihasilkan berupa displacement pada massa utama (x_1) yang akan menjadi input pada objek uji yang menempel pada massa utama. Output pada objek uji yang dihasilkan adalah displacement (x_2). Kedua pemodelan tersebut menghasilkan *transient response* dari sistem.

3.1.11 Penentuan Variasi Input Arus dan Material Objek

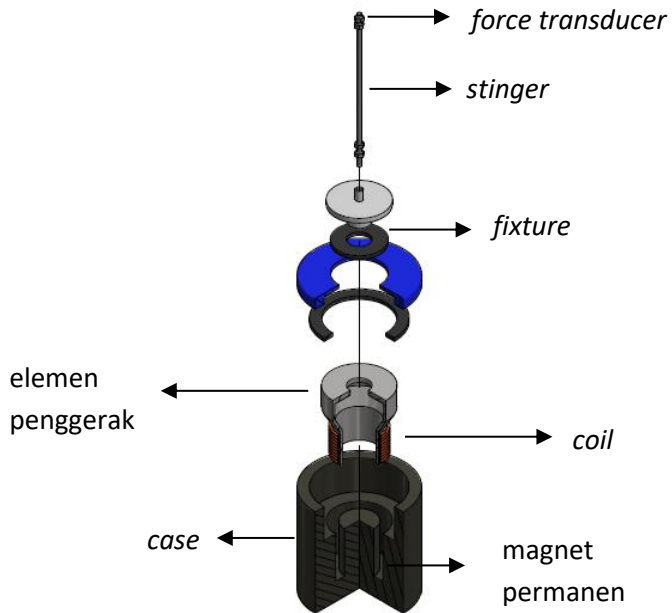
Pada tahap ini ditentukan variasi nilai i (kuat arus) dari sistem elektrik *electrodynamics shaker* dan material objek uji yang nantinya akan digunakan sebagai nilai parameter pada blok diagram sistem yang telah dibuat di Matlab SIMULINK dari sistem yang telah ditemukan nilai c yang sesuai. Variasi nilai dimaksudkan agar sistem dapat mengetahui respon sistem saat terkena perubahan input arus ataupun material objek uji. Nilai i menentukan besarnya gaya eksitasi yang ditimbulkan oleh sistem elektrik pada *electrodynamic shaker*. Adapun, pada kenyataan penggunaan *electrodynamics shaker* nantinya, variasi nilai i dari sistem elektrik sistem dapat dipenuhi dengan dioda. Dioda dapat mengatur besarnya hambatan induktansi dan hambatan resistansi agar dapat mengatur i yang diberikan sistem agar bervariasi.

3.1.12 Analisa Grafik Respon Dinamis Input Step, dan Respon Dinamis Variasi

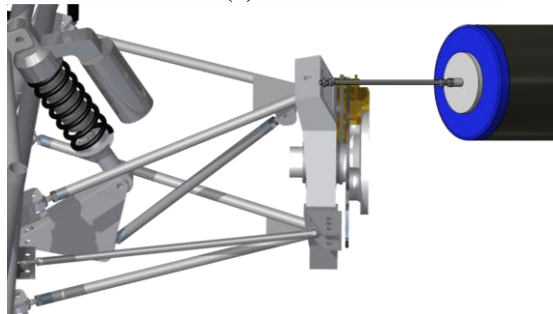
Simulasi sebelumnya akan menghasilkan grafik berupa respon dinamis dari sistem. Grafik yang akan dianalisa yaitu grafik respon dinamis sistem terhadap waktu (t). Pada input step, grafik akan dianalisa bagaimana respon tersebut stabil/*steady* lagi setelah mendapatkan gangguan. Sedangkan pada variasi arus, grafik akan dianalisa bagaimana pengaruh perubahan arus listrik yang diberikan terhadap sistem.

3.2 Pemodelan Dinamis dan Penentuan Persamaan Gerak dari Rancangan Sistem *Electrodynamic Shaker*

Pemodelan dari rancangan sistem *electrodynamic shaker* merupakan pemodelan dengan dua derajat kebebasan (2 DoF). Pemodelan ini disederhanakan dengan menggunakan sumbu horizontal sebagai arah *displacement* seperti yang terlihat pada gambar 3.3.

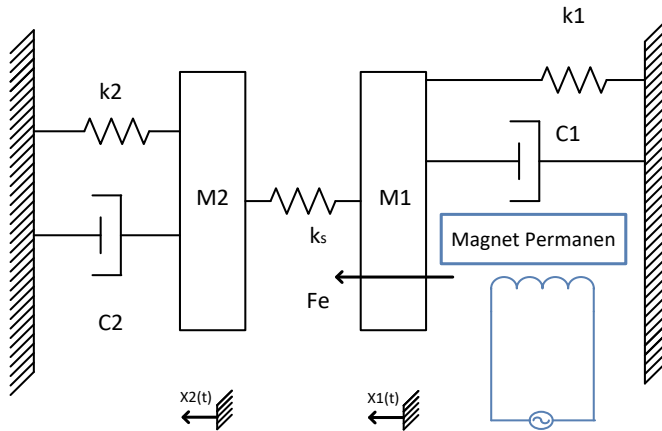


(a)



(b)

Gambar 3.2 *Electrodynamic shaker* (a) model fisik, (b) instalasi pada objek uji



Gambar 3.3 Model dinamis sistem utama dengan objek uji berupa *A-Arm*

Keterangan gambar:

$M1$ = massa *Electrodynamic Shaker*

$M2$ = massa Objek (*A-Arm*)

$K1$ = kekakuan *Electrodynamic Shaker*

$C1$ = redaman *Electrodynamic Shaker*

Ks = kekakuan *stinger*

$K2$ = kekakuan *A-Arm*

$C2$ = redaman *A-Arm*

F_e = gaya akibat sistem elektrik *Electrodynamic Shaker*

Setelah didapatkan model dinamis, maka selanjutnya membuat persamaan gerak dari sistem tersebut. Perpindahan yang terjadi pada sistem utama adalah translasi arah horizontal. Parameter yang akan digunakan pada simulasi ini dapat dilihat pada tabel dibawah.

Tabel 3.1 Parameter yang digunakan dalam perhitungan

Parameter	Simbol	Nilai
Massa electrodynamic shaker (kg)	M1	6 kg
Massa a-arm (kg)	M2	0.46857 kg
Shaker stiffness (N/m)	k1	2600 N/m
A-arm stiffness (N/m)	k2	27086813.24 N/m
A-arm damping (Ns/m)	c2	1427.123469 Ns/m
α (electromechanical coupling)	α	26.68
Hambatan listrik (resistance; Ω)	R	0.5 Ω
Stinger stiffness (N/m)	ks	129877040 N/m

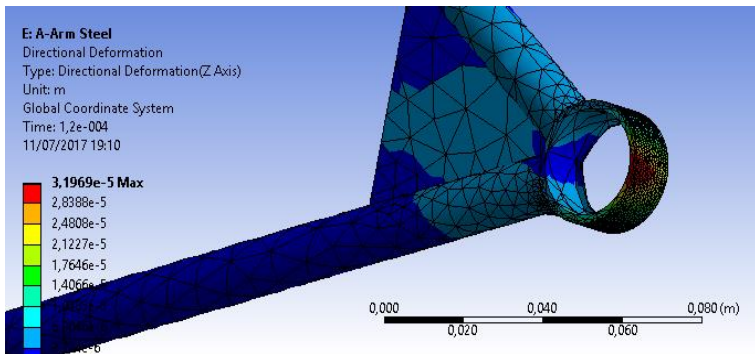
Tabel 3.2 Parameter yang digunakan dalam variasi arus dan material objek

Parameter	Simbol	Nilai
Arus I (A)	I_1	12.5 A
Arus II (A)	I_2	10.5 A
Arus III (A)	I_3	14.5 A
Massa a-arm dengan <i>carbon fiber</i> (kg)	M2a	0.10625 kg
<i>Carbon fiber</i> A-arm stiffness (N/m)	k2a	32699329.66 N/m
<i>Carbon fiber</i> A-arm damping (Ns/m)	c2a	7111.396875 Ns/m

Tabel 3.3 Data karakteristik variasi material yang digunakan

Carbon Fiber Properties	Nilai	unit
Tensile Strength	3310	Mpa
Tensile Modulus	240	Gpa
Strain	1.6	%

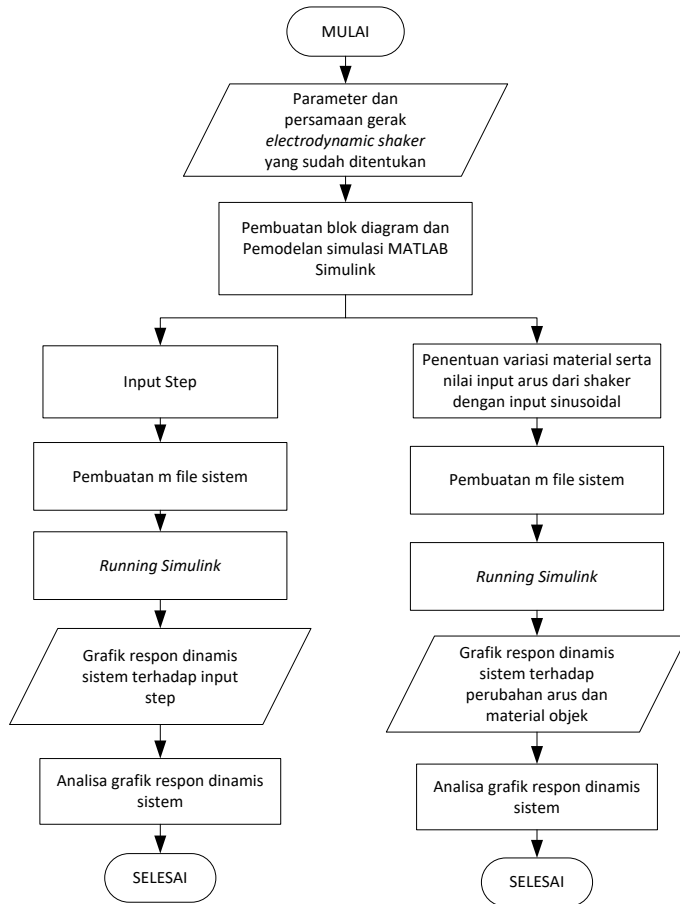
Density	1.78	g/cm ³
Yield	220	g/1000m
Sizing Type and Amount	1.0 – 1.5	%
Elastic Modulus	241	Gpa
Percent Elongation	1.8	%
Poison Ratio	0.1	



Gambar 3.4 Perhitungan *displacement* maksimum dengan *step force* (280 N) pada *steel a-arm*

3.3 Simulasi

Proses simulasi pada pemodelan sistem utama dimulai dengan input yang digunakan berupa *sinusoidal* dan *step* input, outputnya adalah *displacement* pada massa. Proses pembuatan blok diagram pada Simulink dengan variasi dari sistem utama dijelaskan berupa diagram alir pada gambar 3.5. Input yang digunakan yaitu input *sinusoidal* dan *step*.



Gambar 3.5 Diagram alir pembuatan blok diagram Simulink variasi sistem *electrodynamic shaker*

3.3.1 Analisis Grafik Sistem *Electrodynamic Shaker*

Dari simulasi sistem *electrodynamic shaker*, akan didapatkan respon dinamis, berupa perpindahan, kecepatan, maupun percepatan dari input sinusoidal maupun step dengan memodifikasi blok diagram pada Simulink. Grafik-grafik tersebut

dianalisis dan diharapkan sistem *electrodynamic shaker* ini mampu mengeksitasi besaran gaya yang diinginkan agar menghasilkan perpindahan yang sesuai untuk pengujian *A-Arm* pada *Sapuanin Speed*. Selanjutnya dilakukan evaluasi dan mengambil kesimpulan dari hasil analisis dan evaluasi yang telah dilakukan.

3.4 Blok Diagram

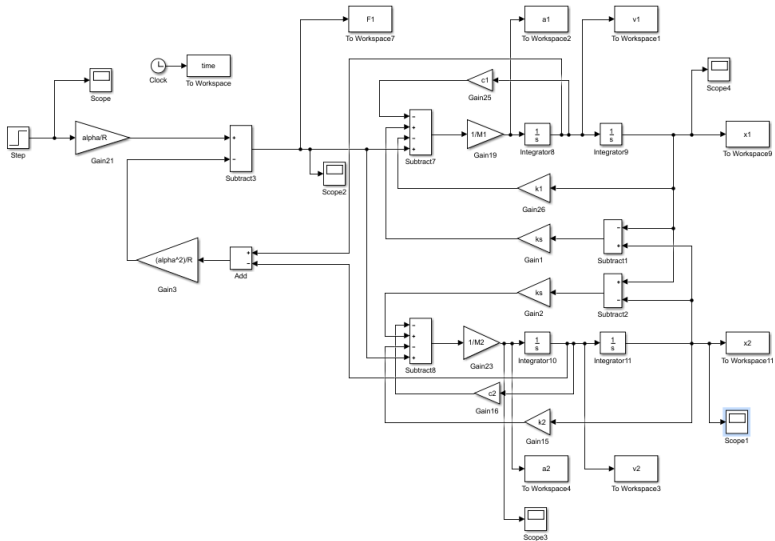
3.4.1 Input yang Digunakan

Pada tugas akhir ini akan dilakukan simulasi untuk rancangan sistem *electrodynamic shaker* untuk pengujian dinamis *a-arm* pada *Sapuanin Speed*. Pada saat pemodelan pada program simulasi digunakan dua macam input, yang pertama yaitu input sinusoidal yang akan menghasilkan respon *steady state*. Kedua, input step, kemudian akan menghasilkan respon transien. Persamaan dari kedua input tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

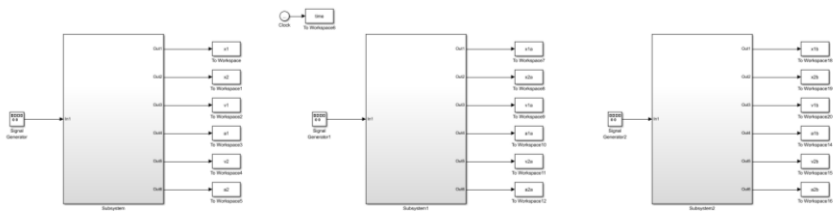
- Input sinusoidal; $y(t) = Y \sin \omega t$. Pada persamaan input sinusoidal tersebut, nilai Y merupakan amplitudo dari arus yang digunakan, yaitu sebesar 12.5 A. Pada input sinusoidal tersebut digunakan variasi tiga buah arus (10.5 A, 12.5 A, dan 14.5 A) dan dua buah variasi material uji (Steel dan Carbon Fiber). Sedangkan frekuensi yang digunakan adalah frekuensi input listrik sebesar 50 Hz.
- Input step; Pada persamaan input step tersebut, nilai akhir yang digunakan merupakan arus terbesar yaitu 12.5 A. Sedangkan frekuensi yang digunakan adalah frekuensi input listrik sebesar 50 Hz.

3.4.2 Blok Diagram Utama dan Variasi

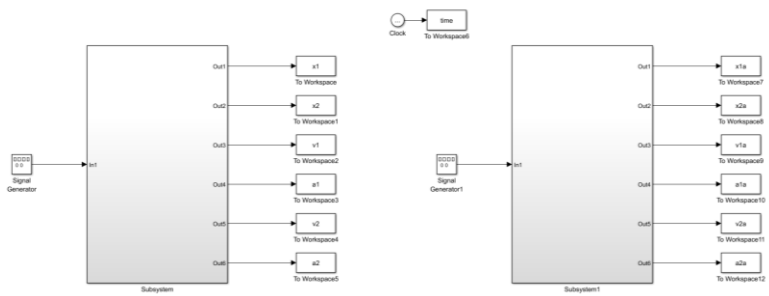
Untuk mengetahui respon dinamis komponen *A-Arm* terhadap rancangan sistem *electrodynamic shaker* tersebut, maka pada simulasi MATLAB diberikan input sinusoidal yang dapat merepresentasikan gaya dinamis oleh shaker. Simulasi dengan input *step* dilakukan untuk mengetahui bagaimana *transient response* pada rancangan sistem *electrodynamic shaker*.



Gambar 3.8 Blok diagram sistem utama oleh MATLAB Simulink dengan input step



Gambar 3.9 Blok diagram subsistem pertama oleh MATLAB Simulink dengan input sinusoidal dan variasi 3 buah arus



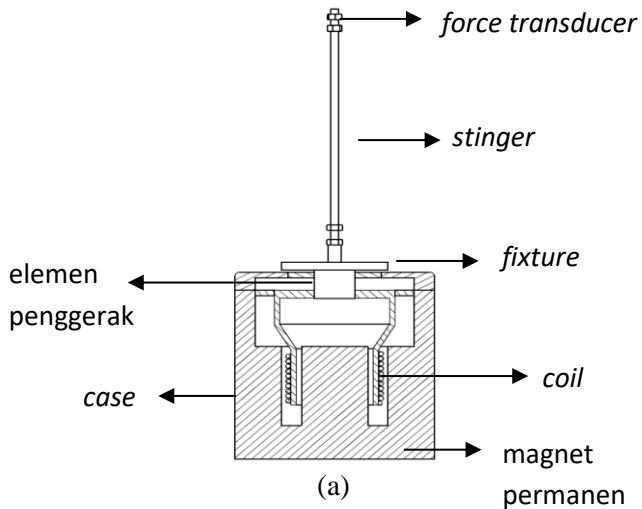
Gambar 3.10 Blok diagram subsistem kedua oleh MATLAB Simulink dengan input sinusoidal dan variasi 2 buah material uji

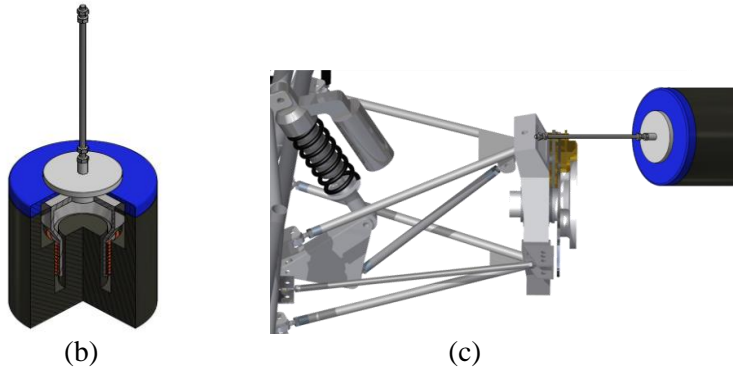
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perancangan Sistem *Electrodynamic Shaker* beserta Komponen *A-Arm*

Pemodelan dari rancangan sistem *electrodynamic shaker* merupakan pemodelan dengan dua derajat kebebasan (2 DoF). Pemodelan ini disederhanakan dengan menggunakan sumbu horizontal sebagai arah *displacement* seperti yang terlihat pada gambar 4.1.

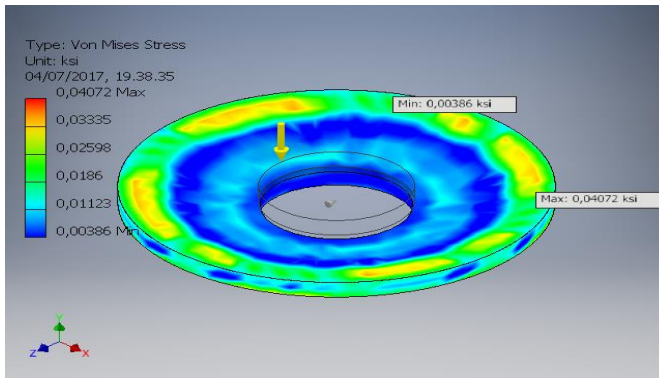




Gambar 4.1 Rancangan *electrodynamic shaker* (a) model sistematis, (b) model fisik, (c) instalasi pada objek uji

4.1.1 Verifikasi Konstanta Kekakuan

Flexible support pada *electrodynamic shaker* memiliki material *rubber membrane* dengan konstanta kekakuan yang telah tertera pada katalog kemudian dilakukan simulasi dengan *Autodesk Inventor software* untuk dianalisa tingkat keamanannya. Hasil analisa dengan *software* dapat dilihat melalui gambar berikut.

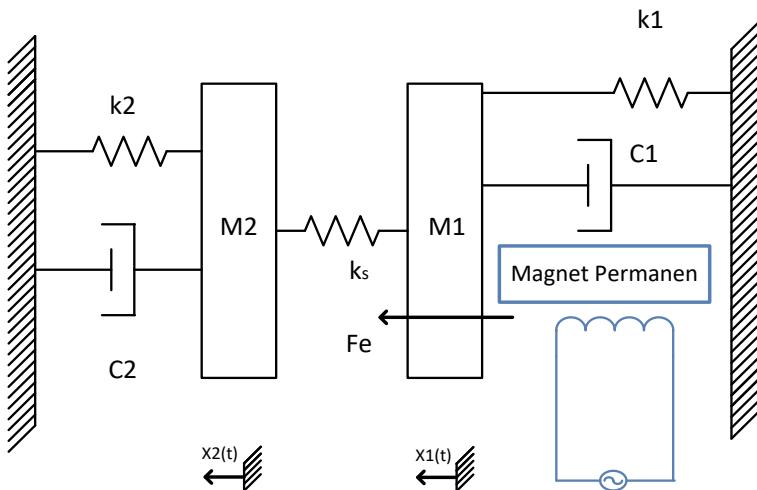


Gambar 4.2 Analisa tingkat keamanan pada *flexible support*

Berdasarkan gambar diatas, ditunjukkan bahwa konstanta kekakuan yang tertera pada katalog aman dan sesuai untuk dimensi *shaker* yang dijadikan acuan dalam perancangan sistem. *Flexible support* yang digunakan adalah *rubber membrane* dengan ketebalan 0.15 inch dan *stiffness coefficient* sebesar 2600 N/m.

4.2 Pemodelan Sistem *Electrodynamic Shaker* beserta Komponen *A-Arm*

Rancangan sistem *electrodynamic shaker* tersebut menghasilkan gaya eksitasi yang dapat disederhanakan seperti yang terdapat pada pemodelan matematis sebagai berikut :



Gambar 4.3 Model dinamis sistem utama dengan objek uji berupa *A-Arm*

Keterangan gambar:

M_1 = massa *Electrodynamic Shaker*

M_2 = massa Objek (*A-Arm*)

K_1 = kekakuan *Electrodynamic Shaker*

C_1 = redaman *Electrodynamic Shaker*

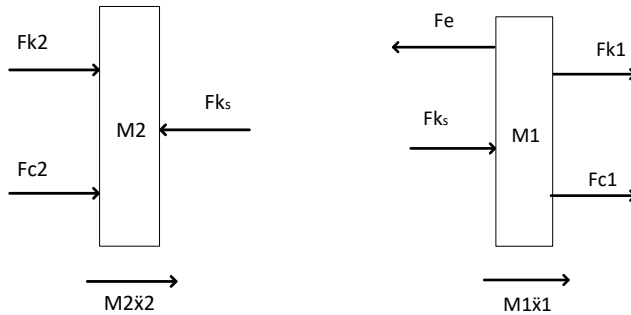
K_s = kekakuan *stinger*

K_2 = kekakuan *A-Arm*

C_2 = redaman *A-Arm*

F_e = gaya akibat sistem elektrik *Electrodynamic Shaker*

Setelah didapatkan model dinamis, maka selanjutnya membuat persamaan gerak dari sistem tersebut. Gambar 4.3 dapat dilihat vektor-vektor gaya yang bekerja pada m_1 dan m_2 yang merupakan *free body diagram* dari sistem utama. Perpindahan yang terjadi pada sistem utama adalah translasi arah horizontal.



Gambar 4.4 *Free body diagram electrodynamic shaker* beserta a-arm

Keterangan Gambar:

$M_1\ddot{x}_1$ = gaya inersia pada M1 yang timbul karena percepatan pada M1 (N)

F_{k1} = gaya pegas pada M1 (N)

F_{c1} = gaya redaman pada M1 (N)

F_{ks} = gaya oleh *stinger* (N)

$M_2\ddot{x}_2$ = gaya inersia pada M2 yang timbul karena percepatan pada M2 (N)

F_{k2} = gaya pegas pada M2 (N)

F_{c2} = gaya redaman pada M2 (N)

Persamaan Gerak Sistem Mekanis *Electrodynamic Shaker*

$$\Sigma F = M1\ddot{x}_1$$

$$\begin{aligned} -Fk_e - Fk_s - Fc_e + Fe &= M1\ddot{x}_1 \\ -Kex_1 - Cex_1 - Ks(x_1 - x_2) + Fe &= M1\ddot{x}_1 \end{aligned} \quad (4.1)$$

dimana $Fe = \alpha i$

$\alpha = 2\pi aN\beta = \text{electromechanical coupling coefficient}$
untuk sistem = konstan (Wb/m)

$a = \text{radius lilitan kawat (wire coil) (m)}$

$N = \text{jumlah lilitan pada sistem elektrik electrodynamic shaker}$

$\beta = \text{flux density (kuat medan magnet) pada sistem elektrik electrodynamic shaker (Wb/m}^2 \text{ / Tesla)}$

$i = \text{kuat arus listrik (A)}$

sehingga persamaan menjadi :

$$M1\ddot{x}_1 + K1x_1 + C1\dot{x}_1 + Ks(x_1 - x_2) - \alpha i = 0 \quad (4.2)$$

State Variable Equation Sistem Mekanis *Electrodynamic Shaker*

$$\dot{x}_1 = v_1$$

$$M1\dot{v}_1 + K1x_1 + C1v_1 + Ksx_1 - Ksx_2 - \alpha i = 0$$

$$M1\dot{v}_1 = -(K1 + Ks)x_1 - C1v_1 + Ksx_2 + \alpha i$$

$$\dot{v}_1 = \frac{1}{M1} [-(K1 + Ks)x_1 - C1v_1 + Ksx_2 + \alpha i] \quad (4.3)$$

Persamaan Gerak Komponen Uji (A-Arm)

$$\Sigma F = M2\ddot{x}_2$$

$$-Fk_2 + Fk_s - Fc_2 = M2\ddot{x}_2$$

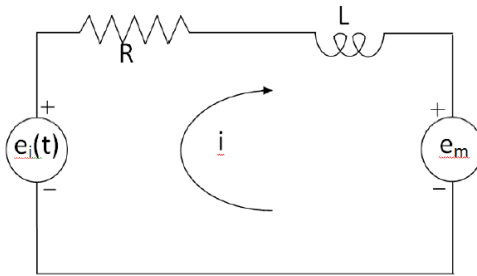
$$-K2x_2 - C2\dot{x}_2 + Ks(x_1 - x_2) = M2\ddot{x}_2$$

$$M2\ddot{x}_2 + K2x_2 + C2\dot{x}_2 - Ks(x_1 - x_2) = 0 \quad (4.4)$$

State Variable Equation Komponen Uji (A-Arm)

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_2 &= v_2 \\
 M_2 \dot{v}_2 + K_2 x_2 + C_2 v_2 - K_{sx1} + K_{sx2} &= 0 \\
 M_2 \dot{v}_2 &= -K_2 x_2 - C_2 v_2 + K_{sx1} - K_{sx2} \\
 \dot{v}_2 &= \frac{1}{M_2} [-K_2 x_2 - C_2 v_2 + K_{sx1} - K_{sx2}] \quad (4.5)
 \end{aligned}$$

Free Body Diagram Sistem Elektrik *Electrodynamic Shaker*



Gambar 4.5 *Free Body Diagram* Sistem Elektrik *Electrodynamic Shaker*

Keterangan gambar:

R = Hambatan resistansi / Kerugian energi listrik (Ω)

L = Nilai hambatan induktansi akibat kehilangan efek magnetik (Henry (H) atau Wb/A)

i = *flux* / kuat arus listrik (A)

e_m = tegangan yang dihasilkan / tegangan yang diinduksi di konduktor (V)

$e_i(t)$ = sumber tegangan (V)

Persamaan Gerak Sistem Elektrik *Electrodynamic Shaker*

$$e_i(t) = L \frac{di}{dt} + Ri + e_m \quad (4.6)$$

Dimana pada batasan masalah no 9 pada Bab 1 telah tertulis bahwa nilai hambatan induktansi akibat kehilangan efek magnetik (L) pada sistem elektrik *electrodynamic shaker* sangat kecil (mendekati nol) sehingga bias diabaikan. Sehingga persamaan diatas menjadi:

$$e_i(t) = Ri + e_m \quad (4.7)$$

Dimana $e_m = \alpha v = \alpha \dot{x} = \alpha(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)$, sehingga persamaan diatas menjadi:

$$e_i(t) = Ri + \alpha(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \quad (4.8)$$

Dimana $\alpha = 2\pi a N \beta = \text{electromechanical coupling coefficient}$
untuk sistem = konstan

a = radius lilitan kawat (*wire coil*) (m)

N = jumlah lilitan pada sistem elektrik
electrodynamic shaker

β = *flux density* (kuat medan magnet) pada sistem
elektrik *electrodynamic shaker* (Wb/m² / Tesla)

State Variable Equation Sistem Elektrik Electrodynamic Shaker

$$i = \frac{1}{R} [e_i(t) - L \frac{di}{dt} - \alpha(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)] \quad (4.9)$$

4.3 Analisa Pemodelan

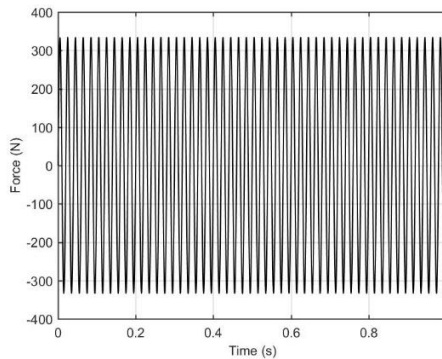
Dalam pemodelan ini didapatkan respon dinamis dari sistem *electrodynamic shaker* dan sistem komponen *A-Arm* dengan penambahan *stinger*. Respon dinamis pada sistem komponen *A-Arm* yang dibahas dalam bab ini adalah respon perpindahan, kecepatan serta percepatan terhadap gaya elektris yang dihasilkan oleh sistem *electrodynamic shaker*.

Input yang diberikan adalah nilai redaman sistem, variasi arus, dan variasi material uji. Sedangkan *output* dari simulasi

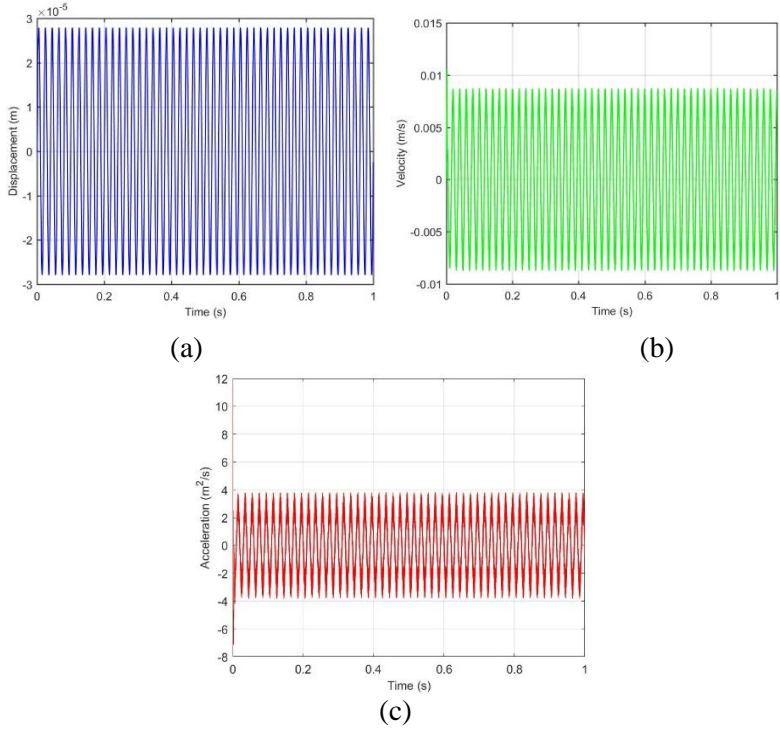
adalah *displacement* sistem dari massa utama (x_1) dan massa objek uji (x_2). Setelah simulasi pada sistem *electrodynamic shaker* dijalankan dengan *input* sinusoidal dan *input step*. Lalu mekukan perbandingan antara grafik sistem utama, dengan variasi arus yang digunakan yaitu sebesar 10.5 A, 12.5 A, dan 14.5 A serta variasi material uji yang digunakan yaitu Steel dan Carbon Fiber.

4.3.1 Respon Dinamis Sinusoidal

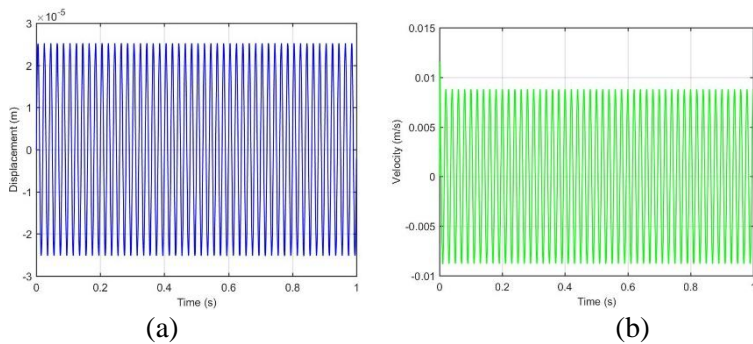
Input sinusoidal digunakan untuk melihat respon dinamis massa utama akibat beban harmonik, serta untuk melihat waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai kondisi *steady state*. Gaya yang bekerja pada komponen A-Arm merupakan gaya yang didapatkan dari mekanisme *electrodynamic shaker*. Gaya tersebut merupakan input sinusoidal yang mampu merepresentasikan gaya eksitasi dinamis *shaker*. Pada simulasi ini juga kemudian dilakukan metode *trial* dan *error* untuk mendapatkan nilai redaman yang sesuai untuk sistem. Dari input ini didapatkan respon dinamis dari sistem *electrodynamic shaker* dan komponen A-Arm.

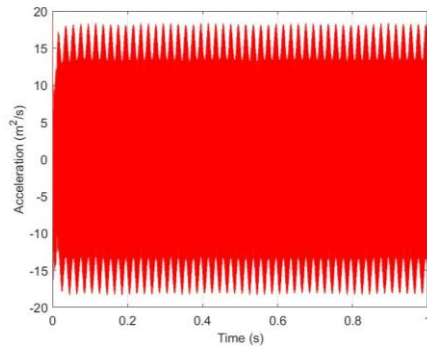


Gambar 4.6 Gaya listrik oleh *electrodynamic shaker* dengan input sinusoidal



Gambar 4.7 Grafik respon dinamis (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan *electrodynamic shaker* dengan input sinusoidal





(c)

Gambar 4.8 Grafik respon dinamis (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan *A-Arm* dengan input sinusoidal

Tabel 4.1 Data hasil respon sistem dengan input sinusoidal

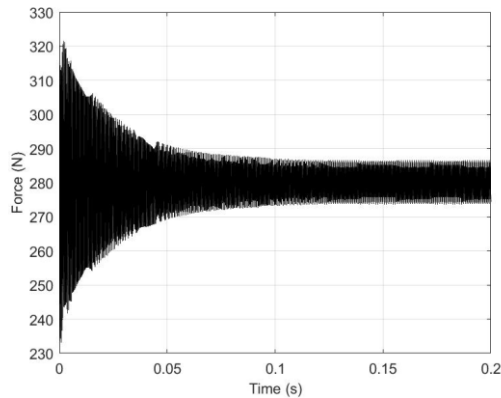
Jenis Respon	Electrodynamic Shaker	A-Arm
x (perpindahan maksimum; m)	0.000027	0.000025
v (kecepatan maksimum; m/s)	0.0088	0.0087
a (percepatan maksimum; m/s ²)	3.81	18.36

Grafik-grafik pada gambar diatas dihasilkan dengan input arus sesuai katalog yaitu sebesar 12.5 A. Gaya listrik yang dihasilkan sebesar 335 N. Dapat dilihat dari table 4.1 bahwa respon perpindahan dan kecepatan dari *electrodynamic shaker* mempunyai hasil yang lebih besar dibandingkan a-arm, namun berbanding terbalik pada respon percepatannya. Respon percepatan pada a-arm menunjukkan hasil yang besar dikarenakan perubahan perpindahannya yang besar dikarenakan oleh pengaruh parameter massa, kekakuan, dan redaman dari a-arm. Pada grafik

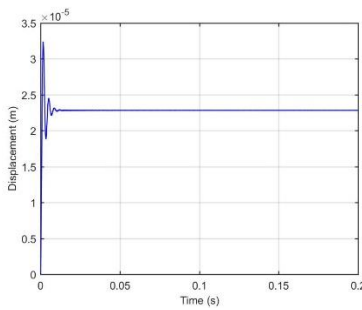
hasil simulasi sistem menunjukkan bahwa objek uji memiliki respon perpindahan lebih kecil daripada shaker. Hal tersebut dapat disebabkan karena objek uji memiliki *stiffness* yang lebih besar. Selain itu, respon perpindahan shaker lebih besar karena gaya listrik terlebih dahulu dikenakan ke shaker dan kemudian diteruskan ke objek uji. Untuk pengaruh *stinger* hampir tidak ada karena rancangan *stinger* yang digunakan memiliki kekakuan yang sangat tinggi sehingga tidak menyebabkan perpindahan tambahan yang besar dari x_1 terhadap x_2 . Pada simulasi ini juga kemudian ditemukan nilai redaman yang ideal untuk sistem electrodynamic shaker yang dirancang adalah sebesar 5000 Ns/m.

4.3.2 Respon Input Step

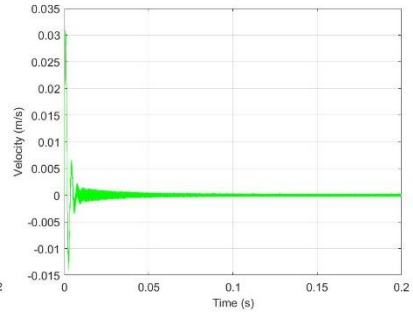
Input step digunakan untuk melihat respon sistem terhadap beban kejut (respon transien). Pada simulasi ini diberikan input step dengan gaya listrik maksimum yaitu 12.5 A.



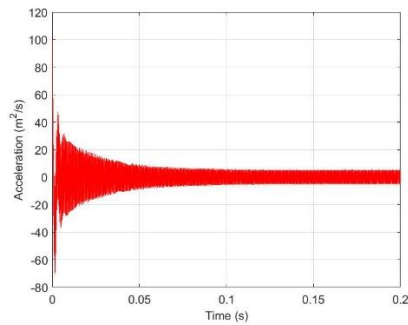
Gambar 4.9 Gaya listrik oleh *electrodynamic shaker* dengan input step



(a)

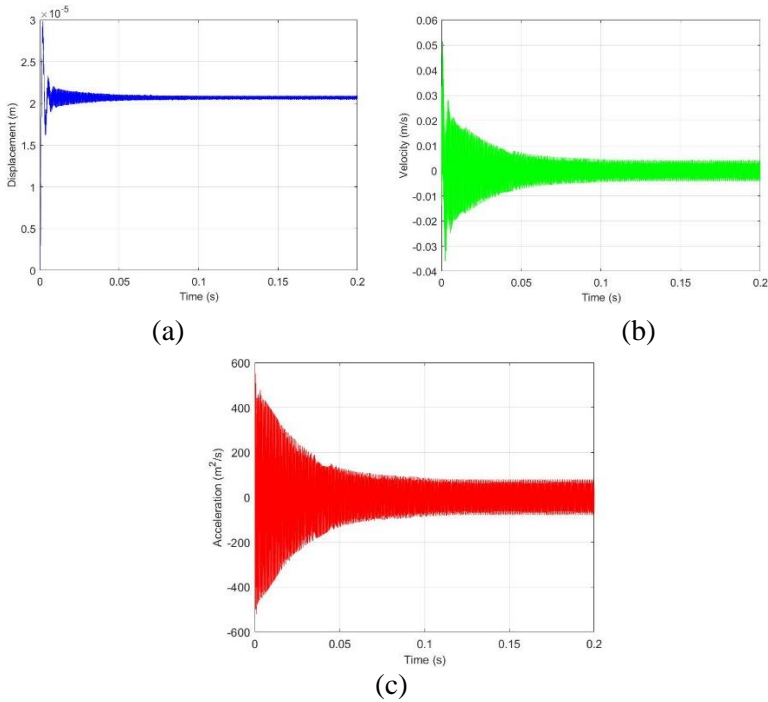


(b)



(c)

Gambar 4.10 Grafik respon dinamis (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan *electrodynamic shaker* dengan input step



Gambar 4.11 Grafik respon dinamis (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan *A-Arm* dengan input step

Tabel 4.2 Data hasil respon sistem dengan input step

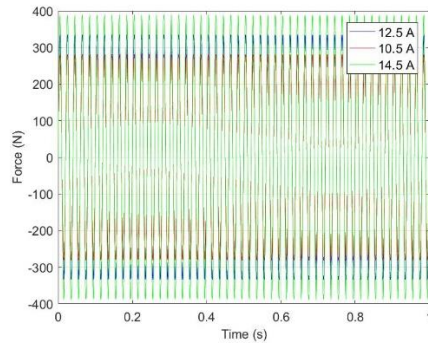
Jenis Respon	Electrodynamic Shaker	A-Arm
x (perpindahan maksimum; m)	0.000032	0.000029
v (kecepatan maksimum; m/s)	0.031	0.051
a (percepatan maksimum; m/s ²)	101	598
Settling time respon perpindahan (s)	0.005	0.02

Settling time respon kecepatan (s)	0.035	0.045
Settling time respon percepatan (s)	0.05	0.1
%Overshoot respon perpindahan	42.14%	44.20%
%Overshoot respon kecepatan	45.75%	44.26%
%Overshoot respon percepatan	37.57%	27.10%

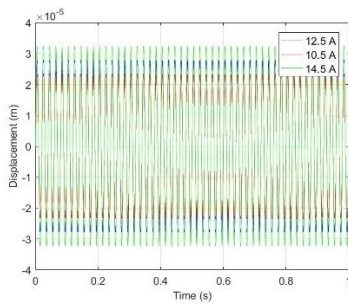
Grafik-grafik pada gambar diatas dihasilkan dengan step input arus sesuai katalog yaitu sebesar 12.5 A. Gaya listrik yang dihasilkan sebesar 391 N. Dapat dilihat dari table 4.2 bahwa respon perpindahan dari electrodynamic shaker masih mempunyai hasil yang lebih besar dibandingkan a-arm, namun berbanding terbalik pada respon kecepatan dan percepatannya. Respon percepatan pada a-arm menunjukkan hasil yang besar dikarenakan perubahan perpindahannya yang besar dikarenakan oleh pengaruh parameter massa, kekakuan, dan redaman dari a-arm. Pada grafik hasil simulasi sistem menunjukkan bahwa objek uji memiliki respon perpindahan lebih kecil daripada shaker. Untuk settling time terendah yaitu pada respon perpindahan shaker dan tertinggi pada respon percepatan a-arm. Sedangkan untuk %overshoot dari sistem sebagian besar memiliki nilai dibawah 50%.

4.3.3 Respon Dinamis Variasi Arus dan Material A-Arm

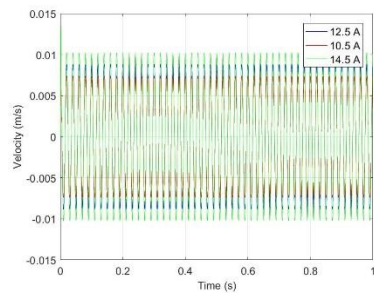
Selanjutnya dilakukan simulasi dengan variasi nilai i (kuat arus) dari sistem elektrik *electrodynamics shaker* dan material objek uji yang nantinya akan digunakan sebagai nilai parameter pada blok diagram sistem. Variasi nilai dimaksudkan agar sistem dapat mengetahui respon sistem saat terkena perubahan input arus ataupun material objek uji.



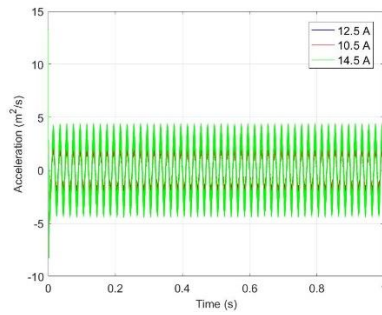
Gambar 4.12 Gaya listrik oleh *electrodynamic shaker* dengan variasi besar arus oleh input sinusoidal



(a)

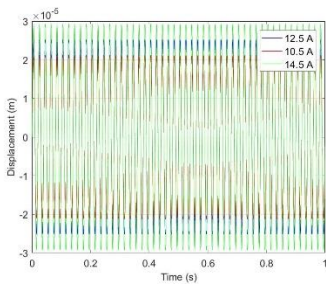


(b)

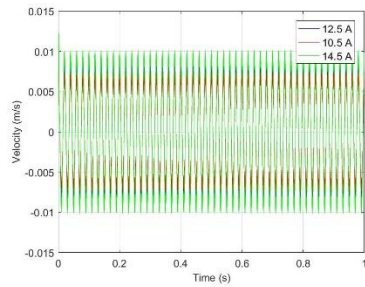


(c)

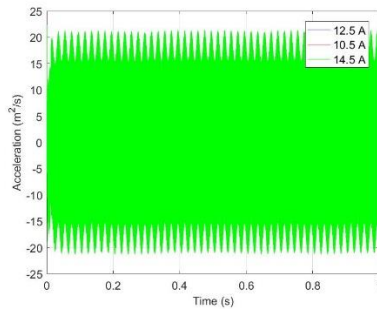
Gambar 4.13 Grafik respon dinamis (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan *electrodynamic shaker* dengan variasi besar arus oleh input sinusoidal



(a)



(b)



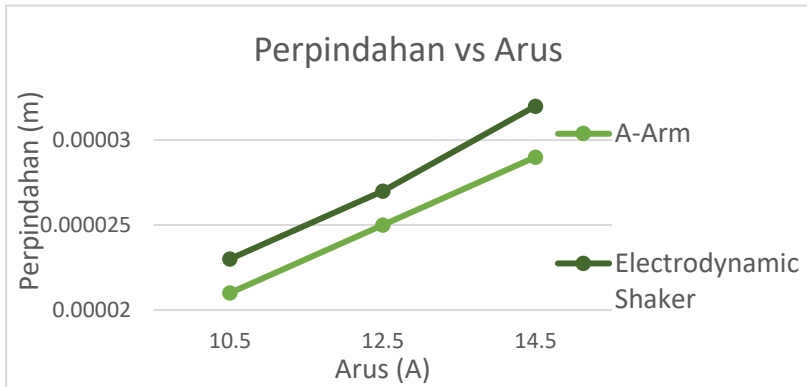
(c)

Gambar 4.14 Grafik respon dinamis (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan *A-Arm* dengan variasi besar arus oleh input sinusoidal

Tabel 4.3 Data hasil respon sistem dengan variasi arus

Simbol	Jenis Respon	Arus (A)			% perubahan $i = 10.5$ A	% perubahan $i = 14.5$ A
		10.5	12.5	14.5		
x1	perpindahan maks. M1	0.000023	0.000027	0.000032	-14.814815	15.625
v1	kecepatan maks. M1	0.0073	0.0088	0.01	-17.045455	12
a1	percepatan maks. M1	3.2	3.81	4.4	-16.010499	13.409091
x2	perpindahan maks. M2	0.000021	0.000025	0.000029	-16	13.793103

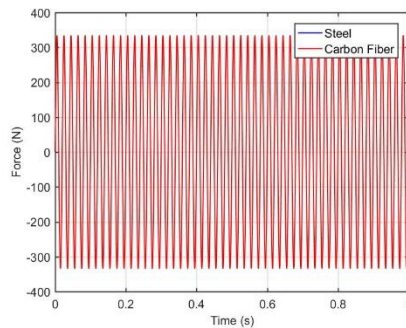
v2	kecepatan maks. M2	0.007 4	0.008 7	0.01	- 14.942 529	13
a2	percepatan maks. M2	15.46	18.36	21.35	- 15.795 207	14.00 4684
Fe	gaya listrik	281	335	388	- 16.119 403	13.65 9794



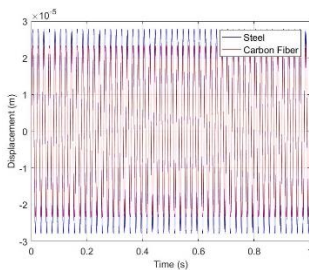
Gambar 4.15 Grafik perubahan besar perpindahan terhadap besar arus

Grafik-grafik pada gambar diatas dihasilkan dengan sinusoidal input dan variasi arus sebesar 10.5 A, 12.5 A, dan 14.5 A. Dari table 4.3 dapat dilihat bahwa dengan semakin besar input arus, maka respon perpindahan massa objek juga semakin besar. Dengan semakin besarnya arus, maka nilai gaya input yang diterima oleh massa utama menjadi semakin besar, sehingga perpindahan yang diteruskan oleh massa utama ke objek juga semakin besar. Nilai i menentukan besarnya gaya eksitasi yang ditimbulkan oleh sistem elektrik pada *electrodynamic shaker*.

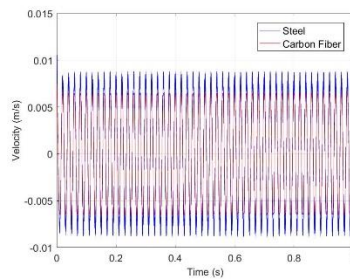
Dapat disimpulkan bahwa arus yang diberikan ke sistem berhubungan dengan gaya listrik yang akan dihasilkan, yaitu sama-sama semakin tinggi nilainya. Ditunjukkan juga bahwa gaya listrik yang semakin tinggi juga menyebabkan respon perpindahan yang lebih besar. Kemudian selain besar arus, dilakukan juga variasi terhadap material objek uji yaitu Steel dan Carbon Fiber yang kemudian menghasilkan grafik seperti pada gambar 4.10.



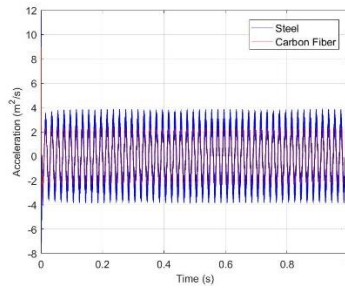
Gambar 4.16 Gaya listrik oleh *electrodynamic shaker* dengan variasi material objek uji oleh input sinusoidal



(a)

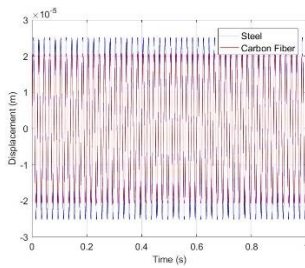


(b)

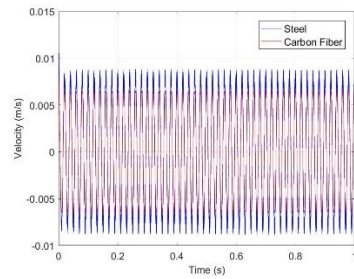


(c)

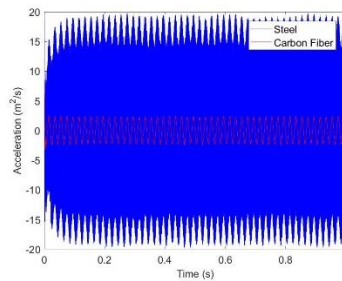
Gambar 4.17 Grafik respon dinamis (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan *electrodynamic shaker* dengan variasi material objek uji oleh input sinusoidal



(a)



(b)

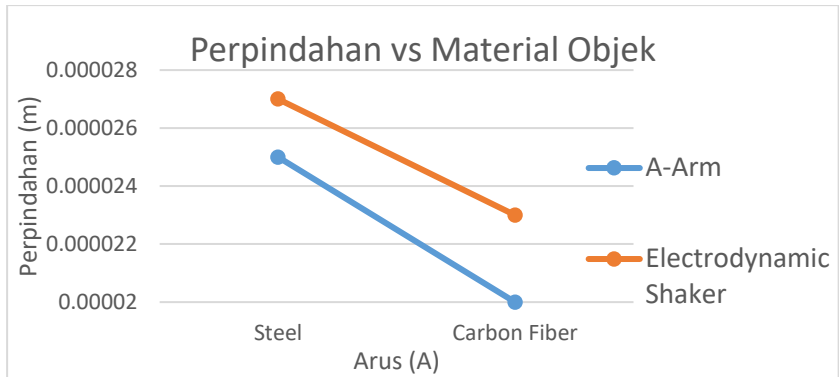


(c)

Gambar 4.18 Grafik respon dinamis (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan *A-Arm* dengan variasi material objek uji oleh input sinusoidal

Tabel 4.4 Data hasil respon sistem dengan variasi material objek uji

Simbol	Jenis Respon	Material Objek Uji		% perubahan
		Steel	Carbon Fiber	
x1	perpindahan maks. massa 1	0.000027	0.000023	-14.8148
v1	kecepatan maks. massa 1	8.80E-03	0.0073	-17.0455
a1	percepatan maks. massa 1	3.81	2.3	-39.6325
x2	perpindahan maks. massa 2	0.000025	0.00002	-20
v2	kecepatan maks. massa 2	0.0087	0.0064	-26.4368
a2	percepatan maks. massa 2	18.36	2.434	-86.7429
Fe	gaya listrik	335	335	0



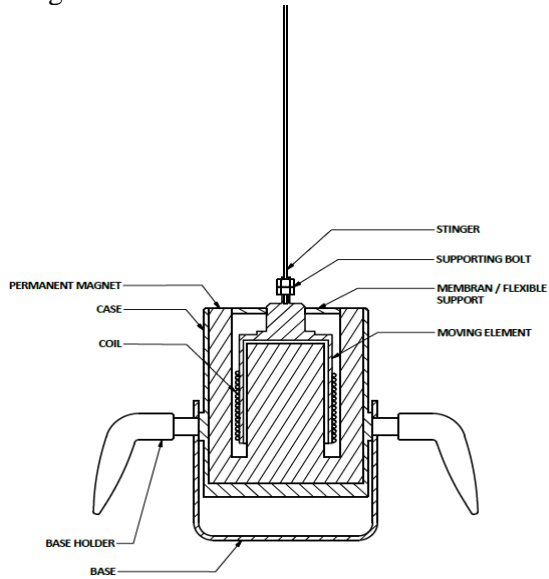
Gambar 4.19 Grafik perubahan besar perpindahan terhadap perbedaan material objek uji

Grafik-grafik pada gambar diatas dihasilkan dengan sinusoidal input dan variasi material objek uji yaitu Steel dan Carbon Fiber. Dari table 4.4 dapat dilihat bahwa pada material Carbon Fiber, respon perpindahan massa utama dan massa objek uji semakin besar. Hal itu dikarenakan material Carbon Fiber dengan desain anyaman serat yang ideal merupakan material yang lebih kaku dan kuat dibandingkan dengan Steel. Dapat disimpulkan bahwa dengan semakin tingginya konstanta kekakuan dari objek uji dengan diberikan gaya elektris yang sama, maka nilai respon perpindahan yang dihasilkan akan semakin kecil.

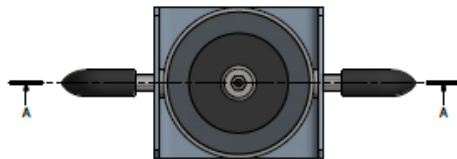
4.3.4 *Electrodynamic Shaker Final Design*

Berdasarkan parameter sistem electrodynamic shaker yang telah ditentukan oleh simulasi dengan input sinusoidal sebelumnya, telah didapatkan nilai redaman dari sistem electrodynamic shaker yang sesuai dengan rancangan. Namun didapatkan hasil *gap* didalam instalasi komponen shaker tidak proporsional dengan nilai redaman sebesar 5000 Ns/m. Dapat disimpulkan bahwa hal tersebut terjadi dikarenakan nilai redaman sistem electrodynamic shaker tidak hanya disebabkan oleh efek

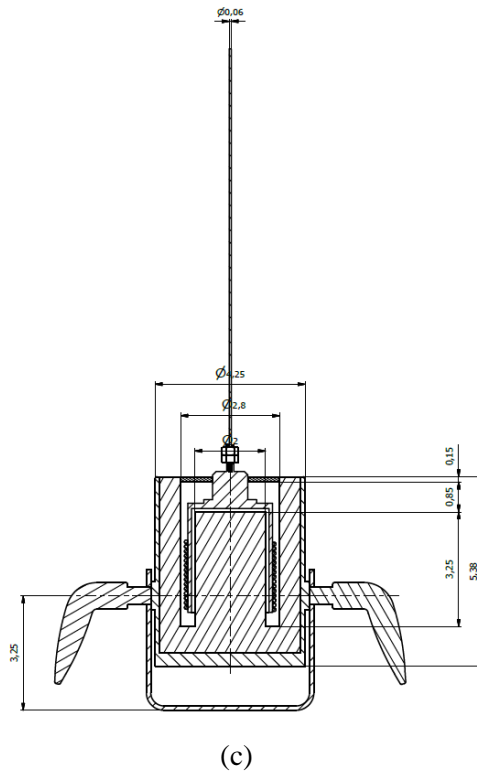
viscous damping namun dapat berasal dari tambahan subsistem lainnya seperti coulomb damping dan faktor sejenis lainnya. Untuk menghasilkan electrodynamic shaker yang sederhana dan dapat dengan mudah di manufaktur, dimensi yang proporsional dapat dilihat pada gambar 4.20.



(a)



(b)



Gambar 4.20 Desain akhir dari *electrodynamic shaker* (a) dengan keterangan, (b) dengan ukuran, (c) tampak atas

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis pada sistem *electrodynamic shaker* serta komponen a-arm, maka dapat disimpulkan bahwa :

1. Telah dirancang sistem *electrodynamic shaker* untuk pengujian dinamis A-Arm pada Sapuangan Speed yang memiliki koefisien *stiffness* oleh *flexible support* sebesar 2600 N/m dengan tebal 0.15 in dan koefisien *damping* sebesar 5000 Ns/m. Getaran yang terjadi pada sistem ini hanya terjadi pada arah translasi.
2. Desain akhir didapatkan bahwa *damping* yang terdapat pada *electrodynamic shaker* tidak hanya disebabkan oleh *viscous damping* pada *shaker gap* karena hasil perhitungan redaman hanya dengan *viscous damping* tidak proporsional untuk dimanufaktur.
3. Pada simulasi respon dinamis dengan input sinusoidal ditunjukkan bahwa objek uji memiliki respon perpindahan lebih baik daripada shaker itu karena nilai dari respon perpindahannya lebih kecil. Objek uji memiliki respon perpindahan lebih baik karena memiliki *stiffness* yang lebih besar. Respon perpindahan shaker lebih besar karena gaya listrik terlebih dahulu dikenakan ke shaker dan kemudian diteruskan ke objek uji. Untuk pengaruh stinger hampir tidak ada karena rancangan stinger yang digunakan memiliki kekakuan yang sangat tinggi sehingga tidak menyebabkan perpindahan tambahan dari shaker terhadap a-arm.
4. Pada simulasi respon dinamis dengan input step terlihat bahwa untuk settling time terendah yaitu pada respon perpindahan shaker dan tertinggi pada respon percepatan a-arm. Sedangkan untuk %overshoot dari sistem sebagian besar memiliki nilai dibawah 50%.

5. Pada simulasi respon dinamis dengan input sinusoidal dan variasi besar arus ditunjukkan bahwa semakin besarnya arus, maka nilai gaya input yang diterima oleh massa utama menjadi semakin besar, sehingga perpindahan yang diteruskan oleh massa utama ke objek juga semakin besar. Dapat disimpulkan bahwa arus yang diberikan ke sistem berhubungan dengan gaya listrik yang akan dihasilkan, yaitu sama-sama semakin tinggi nilainya. Ditunjukkan juga bahwa gaya listrik yang semakin tinggi juga menyebabkan respon perpindahan yang lebih besar.
6. Pada simulasi respon dinamis dengan input sinusoidal dan variasi material carbon fiber ditunjukkan bahwa dengan semakin tingginya konstanta kekakuan dari objek uji dengan diberikan gaya listrik yang sama, maka nilai respon perpindahan yang dihasilkan akan semakin kecil.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, saran untuk pengembangan dalam penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Perlunya dilakukan uji eksperimen untuk memvalidasi simulasi dari hasil matematis perancangan dan pemodelan pada sistem *electrodynamic shaker* yang telah dirancang.
2. Sangat diperlukan perkembangan dan studi lebih jauh untuk sistem rancangan mengingat banyak pengaruh faktor tambahan selain yang terdapat pada tugas akhir ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. S. Rao, **Mechanical Vibrations, Fifth Edition**, 1 Lake Street, Upper Saddle River, NJ 07458: Pearson, 2011.
- [2] Practical Aspects of Shaker Measurements for Modal Testing, USA: **Proceedings of ISMA**, 2010.
- [3] Goshen, "**Mengenal Mikrofon dan Tipe Kerjanya**," [Online]. Available: <http://www.goshen.co.id/detailberita/390-mengenal-mikrofon-tipe-dan-cara-kerjanya..>
- [4] A. C. Cobi, "Design of a Carbon Fiber Suspension System for FSAE Applications," *Semantic Scholar*, 2012.
- [5] H. A. Murtadlo, "**Analisis Kekuatan Carbon Fiber Tube A-Arm Sapuangin Speed dengan Metode Elemen Hingga**," 2016.
- [6] T. M. Shop, "**Modal Shaker Selection Guide**," [Online]. Available: http://www.modalshop.com/excitation.asp?P=Modal_Shaker_Selection_Guide&ID=344.
- [7] D. M. a. JohnW.M.Bush, "Generating uniaxial vibration with an electrodynamic shaker and external air bearing," *ScienceDirect*, 2015.
- [8] F. P. d. M. Barbieri, "Complex Dynamics of Circular Cylindrical Shells," *Elsevier*, 2014.
- [9] T. S. o. A. E. o. Japan, "2017 Student Formula Japan," **The Society of Automotive Engineers of Japan (JSAE)**, [Online]. Available: <http://www.jsae.or.jp/formula/en/about.html>. [Accessed Tuesday April 2017].
- [10] I. o. M. Engineers, **Formula Student**, Silverstone, 9-13 July 2014.
- [11] G. F. Lang, "**Sound and Vibration**," *Electrodynamic Shaker Fundamentals*, p. 1, April 1997.

- [12] Standards Secretariat, Accoustical Society of America. Methods for the Experimental Determination of Mechanical Mobility, Part Two: Measurements Using Single-Point Translational Excitation. (ANSI Standards S2.32-1982), New York: **Accoustical Society of America**, 1982.
- [13] A. P. N.Vivekanandan, "**Design, Analysis And Simulation Of Double Wishbone Suspension System**," June 2014.
- [14] S. S. W. M. I. E. Daryl Hickey, "A Study of The Electrodynamic Shaker," ***International Conference on Vibration Problems***, 2013.

LAMPIRAN

- i. Perhitungan besar *gap* dari *electrodynamic shaker* (jika *damping* hanya berasal dari *viscous damping* oleh *gap*)

Rumus *damping constant*:

$$c = \frac{\mu A}{h}$$

$$5000 \text{ Ns} = \frac{1.983 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2 \times 3.14 \times 0.07112 \text{ m} \times 0.08255 \text{ m}}{h}$$

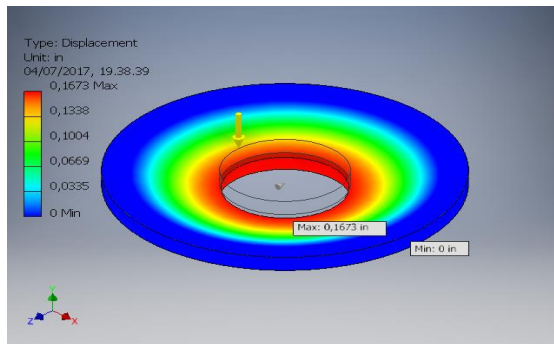
$$h = 7.3112 \times 10^{-11} \text{ m}$$

- ii. Perhitungan dengan besar *gap* yang diinginkan (0.4 in) menghasilkan besar kontribusi *viscous damping* akibat *gap*

$$c = \frac{1.983 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2 \times 3.14 \times 0.07112 \text{ m} \times 0.08255 \text{ m}}{0.01016 \text{ m}}$$

$$c = 3.59805 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}$$

- iii. Analisa *displacement* dari *flexible support*



Gambar 1. Analisa tingkat keamanan pada *flexible support*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Devi Maharani Kosa dilahirkan di Surabaya, 5 November 1996 anak yang terlahir dari orangtua bernama I Gede Rai Kosa dan Ni Luh Suastini Kosa. Riwayat pendidikan penulis diawali di SDN 01 Pagi Johar Baru, Jakarta Pusat. Penulis melanjutkan pendidikannya di SMPN 19, Jakarta Selatan pada tahun 2007-2010, kemudian melanjutkan pendidikannya di SMAN 70, Jakarta Selatan pada tahun 2010-2013. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan jenjang S-1 Jurusan Teknik Mesin di Institut

Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya melalui jalur Program Kemitraan dan Mandiri.

Penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun organisasi selama perkuliahan. Penulis juga pernah menjadi asisten Laboratorium Mekanika Fluida dan Laboratorium Vibrasi. Dalam organisasi kemahasiswaan, penulis aktif menjadi staff dan kemudian menjadi Ketua Divisi Kewirausahaan Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin (LBMM) pada tahun 2015-2016. Pada tahun 2016-2017, penulis aktif menjadi bagian dari Divisi Non-Teknikal ITS Team Sapuangin untuk menghabiskan tahun kuliah terakhirnya.

Motto hidup penulis adalah “*Bersakit-sakit dahulu, bersenang-senang kemudian*” menjadikan penulis lebih bersemangat dan berusaha keras untuk mencapai sesuatu yang diinginkannya. Untuk semua informasi dan masukan terkait tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email devimkosa@gmail.com.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”